

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstrukce

ZAŘÍZENÍ PRO VÝROBU MONOKRYSTALU
EQUIPMENT FOR SINGLE CRYSTAL
PRODUCTION

Student: Rastislav Krč
Vedoucí diplomové práce: Ing. Zdeněk Noga CSc.
Ostrava 2009

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě:

podpis studenta

Prohlašuji že:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3)
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby

V Ostravě:.....

Anotace diplomové práce

KRČ, R. Zařízení pro výrobu monokrystalu. Ostrava: katedra výrobních strojů a konstruování, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 80 s. Diplomová práce, vedoucí Noga, Z.

Diplomová práce se zabývá návrhem zařízení pro výrobu wolframového monokrystalu a navazuje na autorovu bakalářskou práci. Při vzniku návrhu konstrukce bylo použito metodického postupu konstrukční nauky. Výpočtové části jsou věnovány výpočtům týkajícím se dimenzování chladicích soustav jednotlivých konstrukčních uzlů. Výpočty byly provedeny s podporou simulací MKP. Součástí práce je také návrh diagnostických prvků zařízení s nástinem možného způsobu řízení. Přiložené CD kromě této diplomové práce a předepsané výkresové dokumentace obsahuje také 3D model zařízení.

Téma je zvoleno z okruhu problematiky řešené v rámci VZ MŠM 6198910013 "Procesy přípravy a vlastností vysoce čistých a trukturálně definovaných specoálních materiálů."

Annotation of thesis

KRČ, R. Equipment for Single Crystal Production. Ostrava: Department of Production Machines and Design, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2009, 80 s. Thesis, head Noga Z.

Thesis is focused on design of equipment for tungsten single crystal production and it is connected to author`s bachelor thesis. The whole design was developed using the methodical procedure of design science. Solves are focused on designing of cooling system of device. FEM simulation was used during development. Thesis contains design of diagnostic system with speification of its parts and potential control. Enclosed CD contains this thesis, drawings and complete 3D model of the whole equipment.

Thesis is a part of research project MŠM 6198910013 "Processes of preparation and properties of super pure and structured defined materials."

Obsah diplomové práce:

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ.....	10
1 ÚVOD.....	13
1.1 ZHODNOCENÍ STÁVAJÍCÍHO STAVU	13
1.2 ENERGETICKÁ BILANCE PLAZMOVÝCH PECÍ	13
1.3 TECHNICKÝ PROCES A ROZDĚLENÍ DP.....	20
2 CHLADIČ MONOKRYSTALU	20
2.1 POŽADAVKY NA FUNKCI, BEZPEČNOST, DIAGNOSTIKU A ŘÍZENÍ	20
2.2 VOLBA KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ	21
2.3 FUNKČNÍ STRUKTURA	21
2.4 HRUBÁ STAVEBNÍ STRUKTURA	23
2.5 ÚPLNÁ STAVEBNÍ STRUKTURA	24
2.6 VÝPOČTOVÁ ČÁST NÁVRHU	25
2.6.1 <i>Simulace MKP</i>	25
2.6.2 <i>Výpočet parametrů chladicích kanálů jednotlivých sekcí</i>	33
2.7 NÁVRH MATERIÁLU A TLOUŠTKY STĚNY CHLADIČE MONOKRYSTALU.....	40
2.8 STANOVENÍ TLAKOVÝCH ZTRÁT V CHLADICÍCH OKRUŽÍCH SEKCÍ	44
3 PODAVAČ VSÁZKY	46
3.1 POŽADAVKY NA FUNKCI, BEZPEČNOST, DIAGNOSTIKU A ŘÍZENÍ	47
3.2 FUNKČNÍ STRUKTURA	48
3.3 HRUBÁ STAVEBNÍ STRUKTURA	49
3.4 ÚPLNÁ STAVEBNÍ STRUKTURA	51
3.5 VÝPOČTOVÁ ČÁST NÁVRHU PODAVAČE VSÁZKY	53
3.5.1 <i>Simulace rozložení teploty ve vsázce MKP</i>	54
3.5.2 <i>Výpočet chladicího okruhu podavače vsázky</i>	59
3.6 STANOVENÍ TLAKOVÉ ZTRÁTY V CHLADICÍM OKRUHU PODAVAČE	61
3.7 VÝBĚR MOTORŮ PRO POHON PODÁVÁNÍ A VÝMĚNY VSÁZKY	61
4 PRACOVNÍ KOMORA	67
4.1 POŽADAVKY NA FUNKCI, BEZPEČNOST, DIAGNOSTIKU A ŘÍZENÍ	67

4.2	VOLBA KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ	69
4.3	FUNKČNÍ STRUKTURA	70
4.4	HRUBÁ STAVEBNÍ STRUKTURA	70
4.5	ÚPLNÁ STAVEBNÍ STRUKTURA	72
4.6	VÝPOČTOVÁ ČÁST	72
4.6.1	<i>Návrh chladicích okruhů pracovní komory</i>	<i>72</i>
4.6.2	<i>Dimenzování kanálu vzhledem k tlakovým ztrátám</i>	<i>76</i>
5	DIAGNOSTIKA ZAŘÍZENÍ PRO VÝROBU MONOKRYSTALU.....	79
5.1	DIAGNOSTIKA PROCESU MONOKRYSTALU	79
5.2	DIAGNOSTIKA ČÁSTÍ UMOŽŇUJÍCÍCH VÝROBU MONOKRYSTALU	81
6	ARCHIVACE VELIČIN OVLIVŇUJÍCÍCH TECHNOLOGICKÝ PROCES VÝROBY MONOKRYSTALU	83
7	ŘÍZENÍ VELIČIN OVLIVŇUJÍCÍCH PROCES VÝROBY MONOKRYSTALU.....	84
8	ZÁVĚR.....	85
9	SEZNAM PŘÍLOH	86
10	SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ	87
	PŘÍLOHY	93

Seznam použitého značení

Označení	Jednotka	Význam
C	[1]	konstanta závislá na teplotě kapaliny
C_0	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$	součinitel vyzařování černého tělesa
F	[N]	síla
G	[N]	tíha
L	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	měrné skupenské teplo tuhnutí
M	$[\text{N} \cdot \text{m}]$	moment
N	[N]	normálová složka síly
Nu	[1]	Nusseltovo kritérium
O	[m]	obvod
P	[W]	výkon
P_r	[1]	Prantlovo kritérium pro teplotu chladicí kapaliny
P_{rp}	[1]	Prantlovo kritérium pro teplotu stěny
Q	[W]	tepelný tok
Re	[1]	Reynoldsovo číslo
S	$[\text{m}^2]$	obsah plochy
T	[N]	tečná složka síly
a	[m]	délka
a	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	součinitel teplotní vodivosti
b	[m]	délka
c_p	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
d	C	průměr
f	[1]	součinitel tření
g	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$	gravitační zrychlení
h	[m]	výška
i	[1]	převodový poměr

k	$[\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$	lineární součinitel prostupu tepla
l	$[\text{m}]$	délka
m	$[\text{kg}]$	hmotnost
\dot{m}	$[\text{kg.s}^{-1}]$	hmotnostní tok
p	$[\text{Pa}]$	tlak
q	$[\text{W.m}^{-2}]$	hustota tepelného toku
t	$[\text{°C}]$	teplota
v	$[\text{m}]$	výška
v	$[\text{m.s}^{-1}]$	rychlost
w	$[\text{m.s}^{-1}]$	rychlost proudění kapaliny
ΔT	$[\text{°C}]$	přehřátí taveniny
Δt	$[\text{°C}]$	teplotní rozdíl
$\Delta \bar{t}$	$[\text{°C}]$	střední teplotní spád
α	$[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$	součinitel přestupu tepla
ε	$[1]$	emisivita
φ	$[1]$	index směrovosti
λ	$[\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti
λ	$[1]$	třecí součinitel
ρ	$[\text{kg.m}^{-3}]$	hustota
ν	$[\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$	kinematická viskozita

Dolní indexy značí:

bub	týká se bubínku podavače
h	hydraulický
H2O	týká se vody
Chl	týká se chladiče monokrystalu
i	týká se i-tého členu
kan	týká se chladicího kanálu
mag	týká se magnetu

mot	týká se motoru
p	týká sa podavače
pas	týká se pastorku pro otáčení vsázky
pec	ohřívaná teplosměnná plocha
st	týká se stěny
Ve	týká se chlazeného vedení vsázky
vnitřní	chlazená teplosměnná plocha
W	týká se wolframu
zm	ztráta místní
ztr	ztráta třecí

1 Úvod

Diplomová práce navazuje na autorovu bakalářskou práci¹, ze které byla s úpravou převzata konstrukce tažné části zařízení.

1.1 Zhodnocení stávajícího stavu

V současné době jsou v rámci VŠB – Technické univerzity Ostrava pro výrobu monokrystalu používány zařízení, které pro zahřátí vsázky využívají elektronové svazky.

Ve světě je používáno několik zařízení pro výrobu monokrystalu pracujících na podobném principu, tzn. vsázka zahřívána plazmovým hořákem. Jedná se však jen o několik málo kusů, které jsou na univerzitách a slouží k laboratorním účelům.

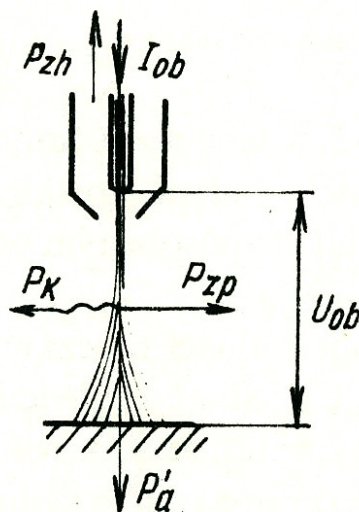
V průmyslové výrobě monokrystalů je nejrozšířenějším způsobem tzv. Czochralského metoda² a dále pak v menší míře Bridgmanova metoda³ a metoda pásmové tavby.

Použití plazmového hořáku pro výrobu monokrystalu lze považovat za pokračování tradice výzkumu materiálů s využitím tohoto způsobu ohřevu, kterou na VŠB – Technické univerzitě Ostrava založil již v 70. letech 20. století.

1.2 Energetická bilance plazmových pecí

U zařízení tohoto typu je největším zatížením pro konstrukci teplo. Pro stanovení potřebných parametrů chladicích okruhů jednotlivých prvků je důležitá znalost energetické bilance. U plazmové pece je stanovení energetické bilance o to náročnější, že plazma září v širokém rozsahu vlnových délek. Proto byly jako podklad pro stanovení energetické bilance zařízení pro výrobu monokrystalu prozkoumány publikované energetické bilance.

Následující energetická bilance platí pro pec s hořákem se závislým obloukem a vychází z energie přivedené na katodu plazmového hořáku a anodu tvořenou taveným kovem a z odvodu teplené energie z přilehlých částí a okolí obloukového sloupce plazmatu. Schéma je na Obrázku 1.



Obrázek 1 – Tepelná bilance plazmového plamene⁵

Platí tedy:

$$P_{el} = P_{ob} = U_{ob} \cdot I_{ob} \approx P_{zh} + P_{zp} + P_k + P'_a \quad [W] \quad (1)^5$$

, kde: $P_{el} = P_{ob}$ je celkový elektrický výkon přivedený sloupcem plazmatu

P_{zh} ... ztráty plazmového hořáku chlazením trysky a katody $[W]$

P_{zp} ... výkonové ztráty způsobené zářením sloupce plazmatu $[W]$

P_k ... výkon, který je odveden ze sloupce plazmatu konvekcí $[W]$

P'_a ... výkon přivedený na anodu elektronovým mechanismem $[W]$

Zjištění ztrát plazmového hořáku je nejjednodušeji zjistitelné kalorimetricky pomocí měření teploty vody na vstupu a na výstupu z tělesa hořáku.

Výkonový podíl P'_a daný elektronovým mechanismem lze vyjádřit vztahem:

$$P'_a = P_{kin} + P_\varphi + P_e \quad [W] \quad (2)^4$$

, kde: P_{kin} ...kinetická energie předaná elektrony tavenému materiálu za jednotku času $[W]$

P_φ ...energie uvolněná při neutralizaci elektronu v taveném materiálu za jednotku času $[W]$

P_e ...energie elektronů získaná jejich průchodem oblastí anodového spádu napětí $[W]$

nebo

$$P'_a = I_{ob} \left(\frac{5}{2} \cdot \frac{k \cdot T_e}{e} + \varphi + U_a \right) \quad [W] \quad (3)^5$$

, kde: k ...Bolzmannova konstanta $[1]$

T_e ...elektronová teplota $[K]$

e ...elementární náboj

U_a ...anodový spád napětí

φ ...výstupní potenciál anodového materiálu

I_{ob} ...hodnota proudu na oblouku

$\frac{5}{2}$...tzv. Eukenova korektura, která vystihuje skutečnost, že

rychleji se pohybující elektrony transportují větší množství energie

Složky bilance působící na taveninu zahrnuje veličina P_a a lze ji vyjádřit podle následujícího vztahu:

$$P_a = P'_a + P'_{zp} + P'_k - P_{za} - P_z - P_{zo} \quad [W] \quad (4)^5$$

, kde: P'_{zp} ... výkon přenesený na tavený materiál prostřednictvím záření
 $[W]$

P'_k ... výkon přenesený na tavený materiál konvekcí $[W]$

P_{za} ... výkon odvedený vodou chlazenou elektrodou $[W]$

P_z ... výkon odvedený z taveného materiálu zářením, konvekcí a
vedením tepla $[W]$

P_{zo} ... ovlivnění odpařováním taveného materiálu $[W]$

Celková energetická bilance má tvar:

$$P_{el} = P_{ob} \approx P'_a + P'_{zp} + P'_k - P_{za} - P_z - P_{zo} - P_{zpe} - P_{zg} - P_{zh} \quad [W] \quad (5)^5$$

, kde: P_{zpe} ... ztráty pecí otvory v plášti – dvířka, atd. $[W]$

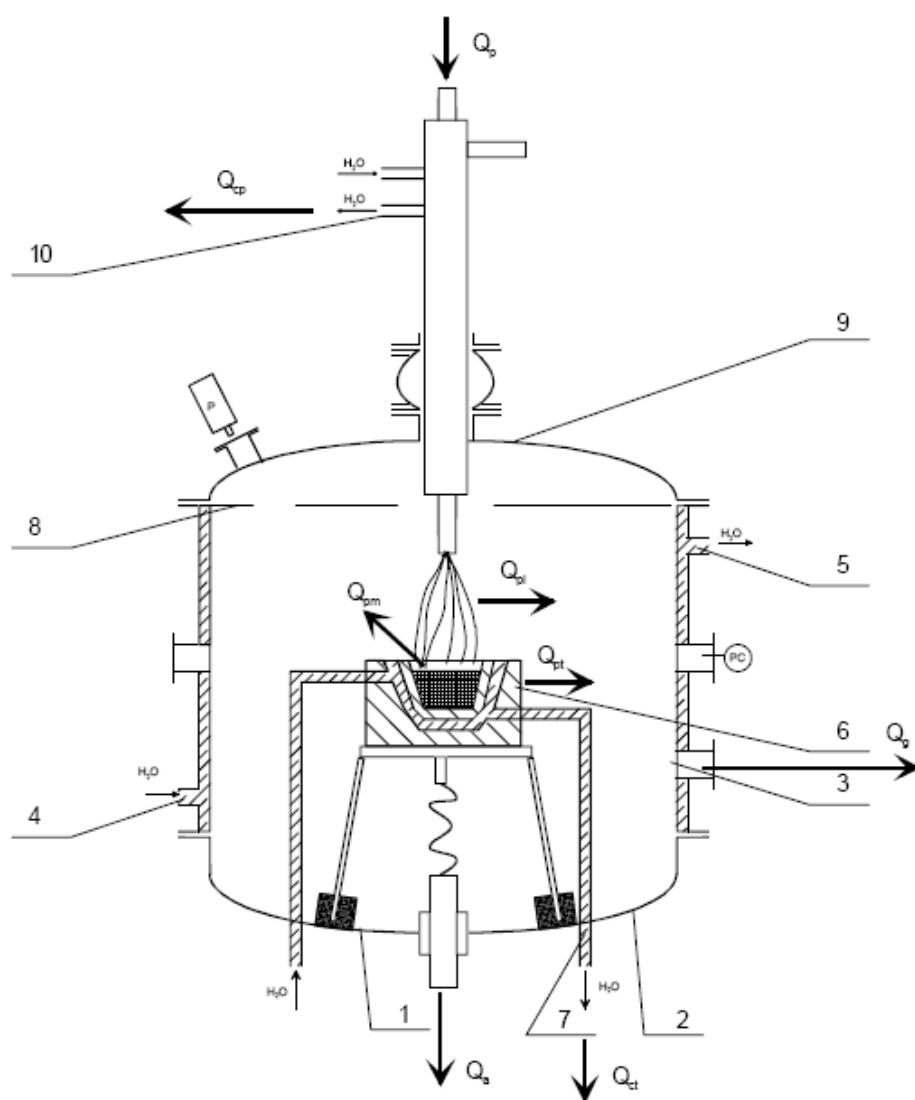
P_{zg} ... ztráty odvodem plynu $[W]$

P_{zh} ... celkové ztráty plazmového hořáku včetně ochrany jeho
pláště $[W]$

Přestože jsou jednotlivé uplatňované procesy známé, je úplné teoretické řešení energetické bilance velmi problematické, protože veličiny a závislosti týkající se především teploty sloupce plazmatu, proudových poměrů na oblouku v peci, anodového spádu napětí, atd. jsou často explicitně neřešitelné. Podle experimentálního měření L.N. Kuzněcova energetické bilance pece s jedním plazmovým hořákem pro vsázku tvořenou 300 kg oceli byly celkové ztráty energie asi 41%. Z toho připadá 20 až 30% na plazmový hořák, 4 až 5% na anodu a zbytek na chlazení stěn, těsnící díly atd. Odvod energie plyny byl 0,1%. Ačkoliv bylo toto měření provedeno na rozměrově a konstrukčně odlišné plazmové peci, prof. Dembovský uvádí s přihlédnutím na výsledky měření energetické bilance u pece se třemi plazmovými hořáky s použitím měděné vsázky:

„Porovnáme-li energetické bilance obou autorů, je přes rozdílnou pecní konstrukci a rozdílné vedení pochod zřejmý dobrý souhlas jednotlivých hodnot. Nepatrné ztráty odvodem plynu uvedené L.N. Kuzněcovem pro plazmovou pec s jedním plazmovým hořákem jsou patrně dány menší spotřebou plazmotvorného plynu“⁵

Mordzynski ve své práci „Heat Balance of Prototype Plasma Furnace for Melting Reactive Metals“⁶, která se zabývá plazmovou pecí určenou pro přetavování slitiny Ti-6Al-4V se závislým obloukem. Pec pracuje s krystalizatorem v podobě měděné, vodou chlazené misky, viz. Obrázek 2.



Obrázek 2 – Plazmová pec s měděným vodou chlazeným krystalizátorem⁶

Výsledná účinnost pece při dvou měřeních byla 49,8% resp. 63,9%. Při interpretaci těchto výsledků potom konstatuje, že dosažená účinnost procesu je na úrovni jiných plazmových pecí popsaných v literatuře.

Při výpočtu se opírá o následující vztah:

$$Q_p = Q_{cp} + Q_{ct} + Q_{pt} + Q_{pl} + Q_{pm} + Q_g + Q_a \quad [W.m^{-2}] \quad (6)^6$$

, kde: Q_p ...tepelný tok generovaný plazmovým hořákem

Q_{cp} ...telný tok odvedený chlazením plazmatronu

Q_{ct} ...teplený tok odvedený chlazením misky

Q_{pt} ...tepelný tok odvedený z radiace misky

Q_{pl} ...tepelný tok radiací a konvekci odvedený z oblouku

Q_{pm} ...tepelný tok radiací a konvekci odvedený z taveného materiálu

Q_g ...tepelný tok odvedený ochrannou atmosférou

Q_a ...tepelný tok odvedený anodou pece

Dále lze uvažovat, že teplo vydávané miskou, plasmovým obloukem a povrchem roztaveného kovu bude absorbováno stěnami pece. Toto lze vyjádřit vztahem:

$$Q_{pt} + Q_{pl} + Q_{pm} = Q_{cd} + Q_{cpw} \quad [W.m^{-2}] \quad (7)^6$$

,kde: Q_{cd} ...tepelný tok odvedený stropem a dnem pece

Q_{cpw} ...tepelný tok odvedený stěnami pece

Po dosazení (7) do (6) dostáváme výsledný vztah:

$$Q_p = Q_{cp} + Q_{ct} + Q_{cpw} + Q_{cd} + Q_g + Q_a \quad [W.m^{-2}] \quad (8)^6$$

Výsledky z měření ve dvou dříve zmiňovaných měřeních jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 1 – Výsledky měření tepelné bilance plazmové pece⁶

Složka	Podíl na bilanci v měření č. 1 [%]	Podíl na bilanci v měření č. 2 [%]
Q_p	100,00	100,00
Q_{cp}	44,32	25,89
Q_{ct}	49,77	63,90
Q_{cpw}	3,13	6,19
Q_{cd}	2,16	3,42
Q_g	0,02	0,06
Q_a	0,60	0,54

Tepelná bilance, která byla změřena na zařízení nejvíce podobném předpokládané konstrukci, byla publikována v článku *Vývojová tendence v konstrukci zařízení pro výzkum materiálu pomocí plazmové technologi⁷*. Výsledky jejich měření jsou uvedeny v Tabulkách 2 a 3:

Tabulka 2 – Odvod tepelné energie do částí plazmové pece s horizontálním krystalizátorem⁷

Místo	Odvod energie chlazením [W]	Odvod energie chlazením [%]
Anoda plazmového hořáku	4375,00	28,28
Katoda plazmového hořáku	27,28	0,18
Chladicí kroužek	42,80	0,27
Plášť pece	1573,32	10,16
Krystalizátor	7328,00	47,80
Příkon plazmového hořáku	15480,00	100,00

Tabulka 3 – Odvod tepelné energie dodávané hořákem nad krystalizátorem⁷

Místo	Odvod energie chlazením [kW]	Odvod energie chlazením [%]
Kontislitek – anoda	19,45	44
Krystalizátor	12,38	28
Komora pece – plyn	2,65	6
Chladicí voda plazmového hořáku	9,28	21
Příkon plazmového hořáku	44,20	100

Porovnáním výsledků autorů zjišťujeme, že hodnoty jsou si dost podobné na to, abychom je mohli použít pro výpočtovou část.

1.3 Technický proces a rozdělení DP

Technický proces⁸ výroby monokrystalu lze, podobně jako ostatní technické procesy, rozdělit do několika částí, jako je příprava, ustavení, atd. Obsahem těchto částí jsou pak jednotlivé funkce a úkony, které je v jejich průběhu potřeba vykonat. Blokové schéma technického procesu je obsahem Přílohy I.

Pro zpřehlednění byl návrh zařízení pro výrobu monokrystalu rozdělen do tří konstrukčních uzlů: chladič monokrystalu, podavač vsázky a pracovní komora.

2 Chladič monokrystalu

Chladič monokrystalu užitý v zařízení pro výrobu monokrystalu s užitím plazmového hořáku musí splňovat několik druhů požadavků. Jedná se o požadavky funkční, bezpečnostní a požadavky plynoucí z diagnostiky a řízení procesu a jeho monitorování.

2.1 Požadavky na funkci, bezpečnost, diagnostiku a řízení

Z hlediska funkce je pro chladič monokrystalu nezbytné, aby hustota tepelného toku byla po jeho výšce rozložena definovaným způsobem. Je nepřípustné, aby monokrystal přišel do styku s jiným materiálem. Samozřejmě je nutné chladič umístit do pracovní komory krystalizátoru. Toto umístění by mělo splňovat podmínku sousostnosti chladiče se vznikajícím monokrystalem, resp. plazmovým hořákem.

Bezpečnostní požadavky v tomto případě zčásti splývají s požadavky funkčními. Je nutno zajistit chlazení tak, aby nedošlo k průvaru, který by měl za následek znehodnocení vznikajícího produktu a také zničení chladiče.

Pro diagnostiku a řízení procesu bude použito několik zařízení. Tato zařízení budou použita k diagnostice chladicí kapaliny chladiče a žádné z nich nebude uvnitř pracovní komory.

Tyto požadavky lze přehledně seřadit do tzv. požadavkového listu⁸ viz. Tabulka 4.

Tabulka 4 – Požadavkový list chladiče monokrystalu

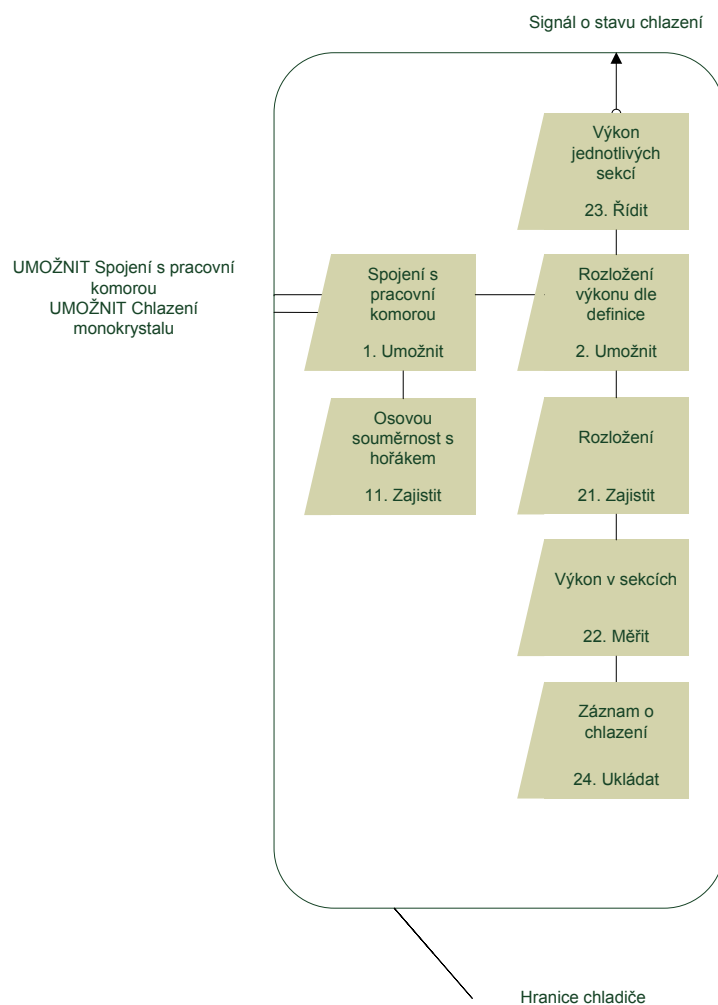
	Přání	Nutnost
Funkční požadavky		
Spojení s pracovní komorou		
- souosé s hořákem		X
- rozebíratelné	X	
- pevné		X
Chladicí výkon		
- rozložený dle definice		X
- říditelný v průběhu procesu		X
Diagnostické nároky		
Měření výkonu chlazení		X
Možnost záznamu	X	
Bezpečnostní požadavky		
Zamezení průvaru		X

2.2 Volba konstrukčních materiálů

Při volbě konstrukčních materiálů lze uvažovat o nerezových ocelích nebo mědi. Konečný výběr bude záviset na vypočtených teplotách chladiče a na schopnosti daného materiálu vést teplo. Mechanické vlastnosti v tomto případě nejsou důležité, neboť těleso chladiče žádná další mechanická zatížení, kromě vlastní tíhy, nepřenáší.

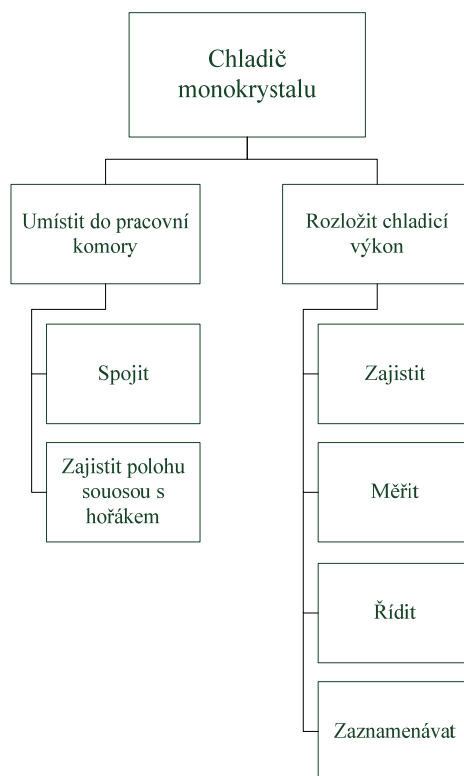
2.3 Funkční struktura

Funkční struktura⁸ zobrazuje všechny požadavky na konstrukci včetně jejich vzájemných vazeb viz. Obrázek 3.



Obrázek 3 – Funkční struktura chladiče monokrystalu

Pro přehledný soupis jednotlivých funkcí byl použit tzv. hierarchický funkční strom⁸ viz. Obrázek 4.

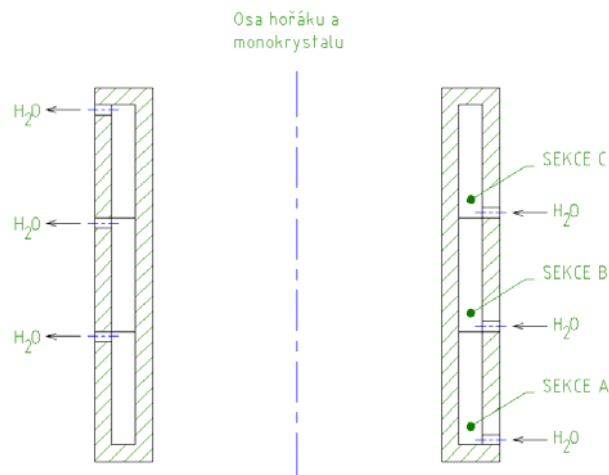


Obrázek 4 – Hierarchický funkční strom chladiče monokrystalu

2.4 Hrubá stavební struktura

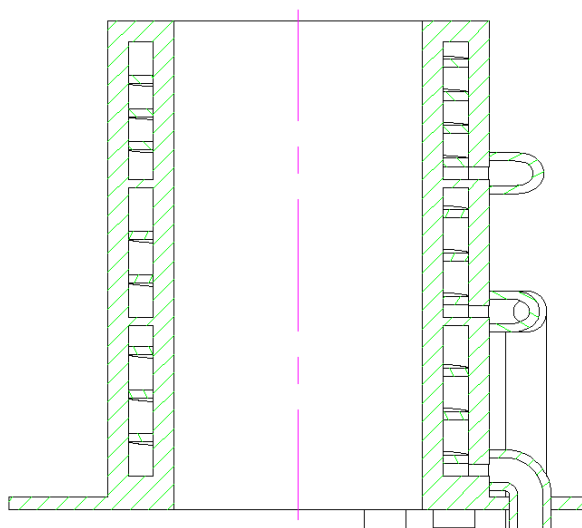
Pro návrh hrubé stavební struktury⁸ použijeme morfologickou matici⁸, viz. Přílohu II., která zobrazuje možná zajištění jednotlivých funkcí zařízení.

Výběrem nejvhodnější kombinace, která je v morfologické matici naznačena červenou čarou, potom získáme orgánovou strukturu⁸, zřejmou z Obrázku 5.



Obrázek 5 – Orgánová struktura chladiče monokrystalu

Od ní je potom odvozená výsledná hrubá stavební struktura, která je na Obrázku 6.

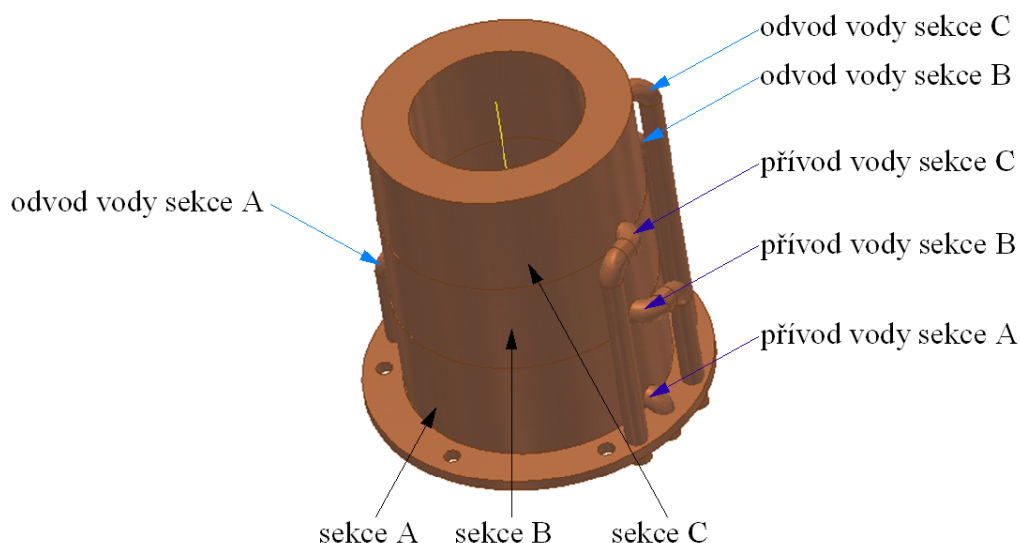


Obrázek 6 – Hrubá stavební struktura

Z morfologické matice lze sestavit mnoho orgánových struktur a následně i hrubých stavebních struktur. Pro potřeby této zprávy byla vybrána pouze varianta, která byla podkladem pro finální návrh.

2.5 Úplná stavební struktura

Úplnou stavební strukturu lze vidět na Obrázku 7.



Obrázek 7 – Úplná stavební struktura chladiče monokrystalu

Nejlépejším zobrazením úplné stavební struktury je však výkresová dokumentace, která je obsažena v tištěných přílohách a spolu s 3D modelem na přiloženém CD.

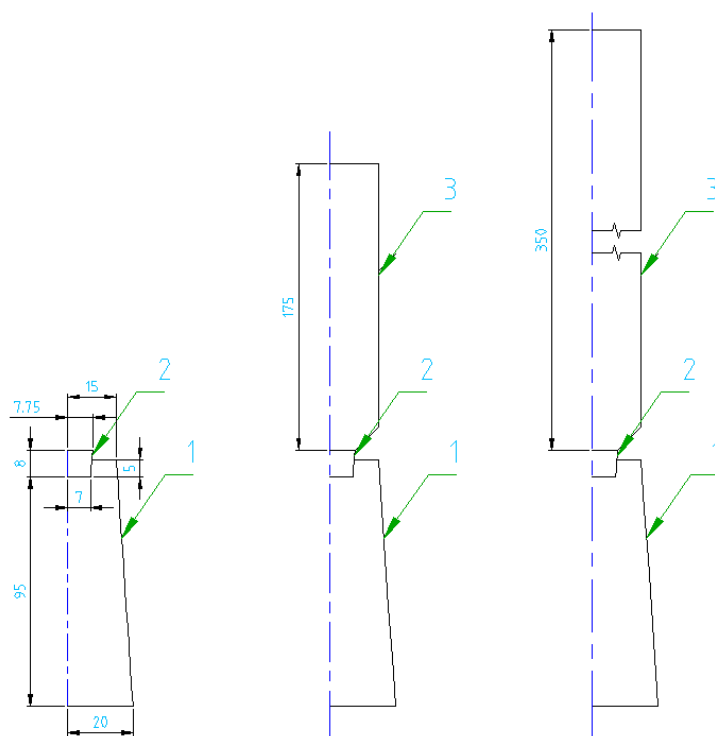
2.6 Výpočtová část návrhu

Pro výpočtovou část je nejdůležitější určení rozložení chladičového výkonu po výšce chladiče. Přestože se, co se tvaru týče, jedná o velmi jednoduchou úlohu, požadavek na laminární proudění, které jediné zjišťuje vznik skutečného monokrystalu, ji velmi komplikuje.

2.6.1 Simulace MKP

Pro určení rozložení hustoty tepelného toku po výšce chladiče bylo použito MKP SW Ansys 11. Bylo nutné vzít v úvahu, že monokrystal je do určité míry chlazen i tažným zařízením. Význam tohoto chlazení však klesá s rostoucí délkou monokrystalu. Proto byly udělány tři simulace, z nichž každá představovala jinou fázi procesu. Kromě obou mezních fází, tzn. úplného začátku výroby a jejího konce byla zvolena ještě fáze, kdy je proces přibližně

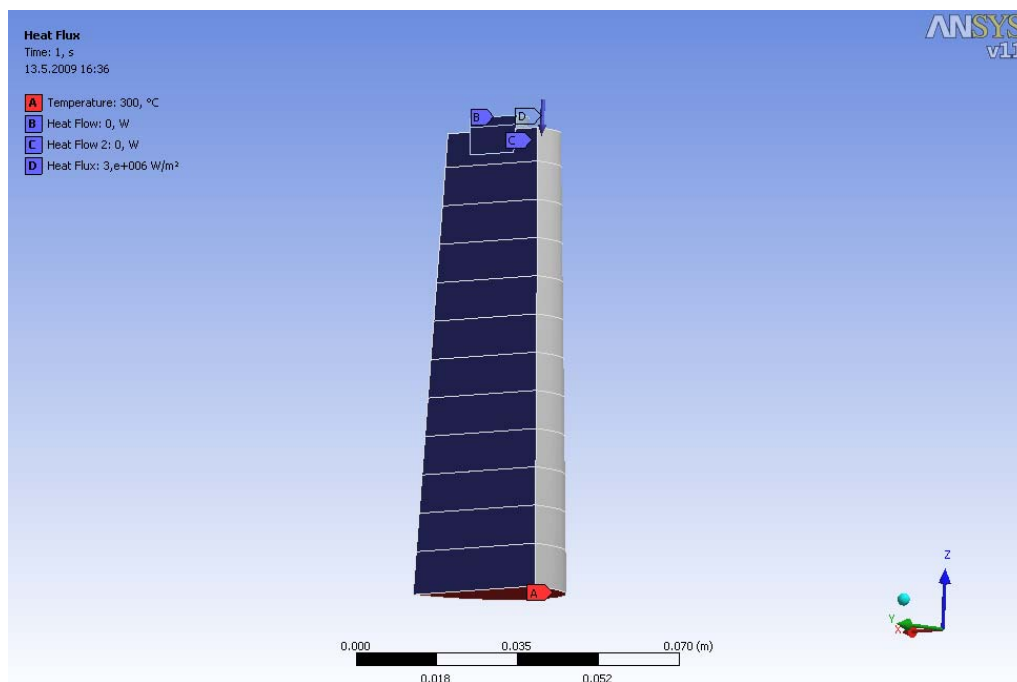
ve své polovině. Pro tyto fáze potom byly provedeny simulace s modely, založenými na výpočtových modelech znázorněných na Obrázku 8.



Obrázek 8 – Modely pro MKP, 1 – W mezikus, 2 – zárodek, 3 – monokrystal

Ansys 11, na kterém byla simulace provedena, ve své materiálové databázi neobsahoval wolfram. Z tohoto kovu jsou všechny tři výše zobrazené části a tak bylo nutno jeho fyzikální vlastnosti zadat. Hodnoty, které byly zadány a použity při simulaci jsou uvedeny v Příloze III.

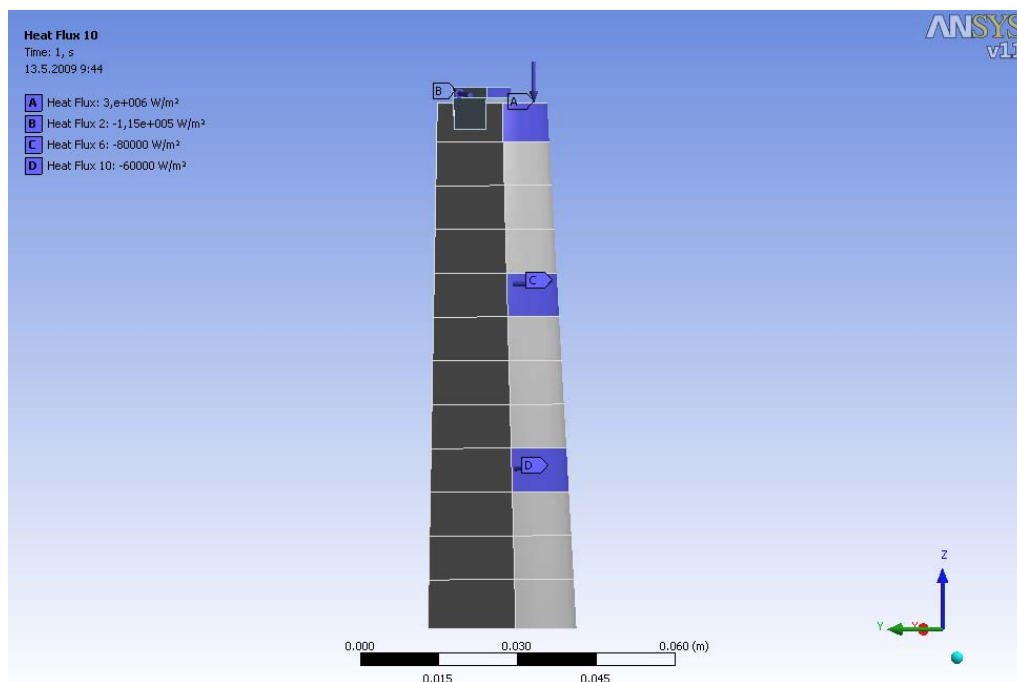
Okrajové podmínky pro simulaci potom byly stanoveny tři. Tou první byla teplota na spodní, chlazené části mezikusu. Tato byla nastavena na 300°C, což odpovídá nejmenšímu účinku chladicí soustavy tažné části zařízení. Druhou byla hustota tepelného toku na povrch vznikajícího monokrystalu, resp. zárodku. Ta byla stanovena po domluvě s vedoucím diplomové práce na hodnotu $3 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Třetí podmínkou byla izolace modelu v rovině řezu, která byla zadána pomocí nulové hustoty tepelného toku na vybraných plochách. viz. Obrázek 9.



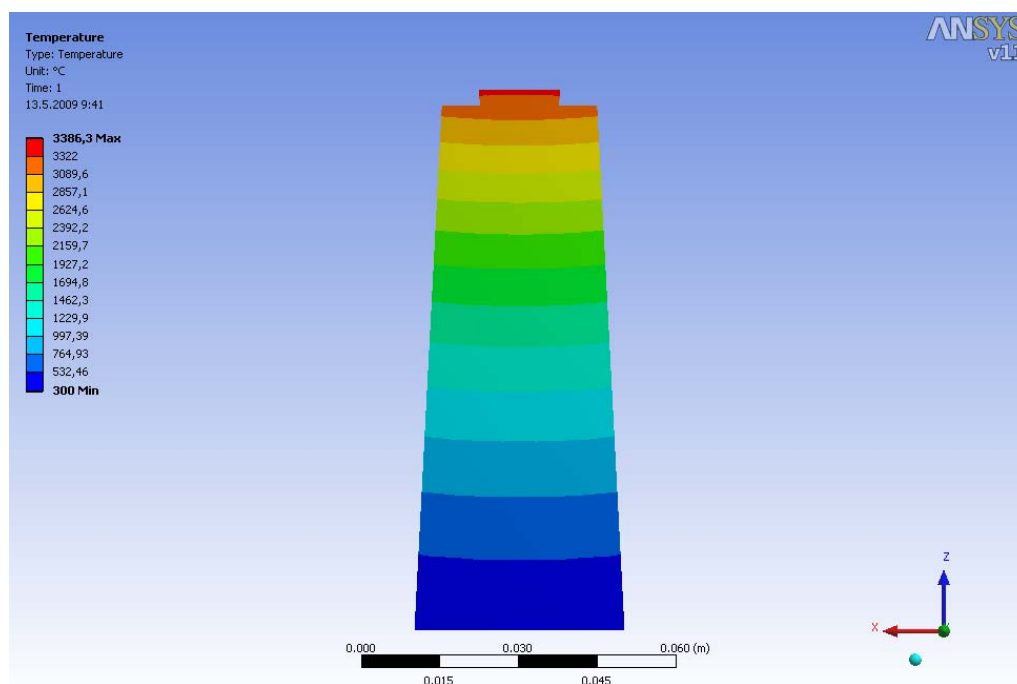
Obrázek 9 – Okrajové podmínky pro simulaci

Uvažovaná výška chladiče je 100 mm a byl pro simulaci rozdělen do 12 oblastí. Ve skutečnosti bude rozdělen do tří stejně velkých sekcí.

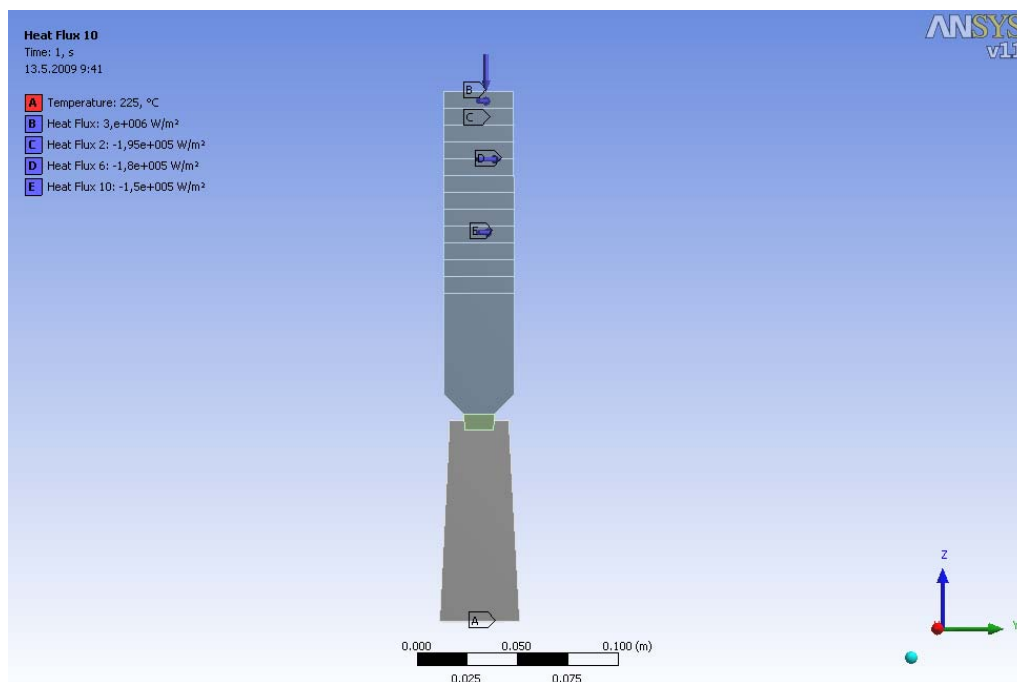
Výsledky simulace jsou ve své podstatě okrajové podmínky, které bylo třeba určit a prověřit. Výsledné hodnoty, které dále poslouží jako vstupní data pro dimenzování chladiče samotného, jsou uvedeny společně s rozložením teplot při jejich použití na Obrázcích 10 až 16 a v Tabulkách 5–7.



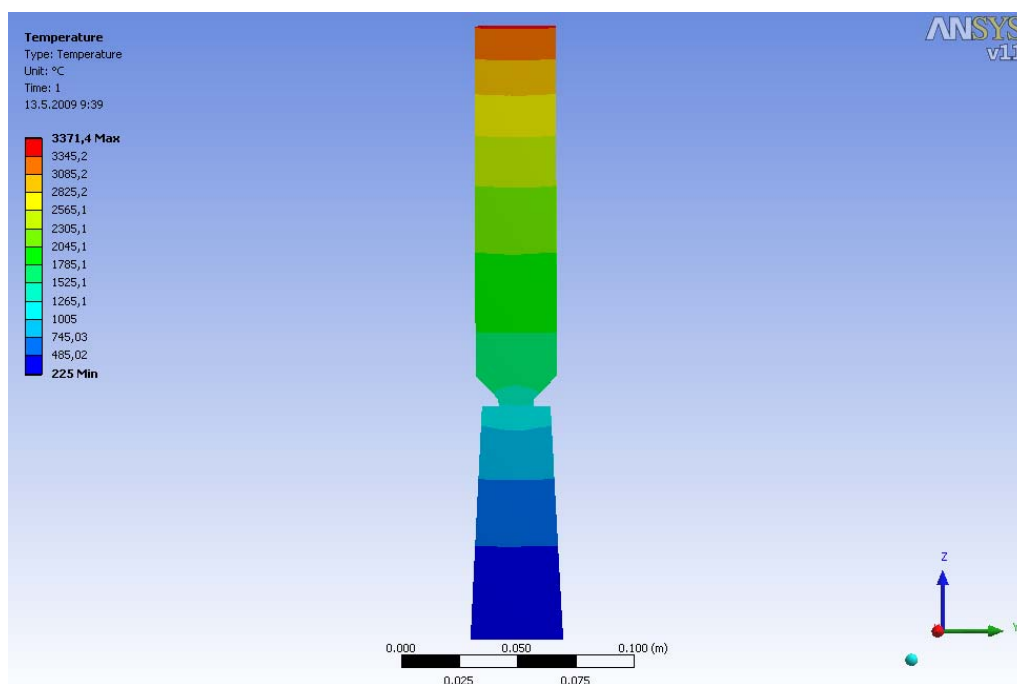
Obrázek 10 – Zjištěné hustoty tepelných toků a okrajové podmínky na začátku procesu výroby monokrystalu



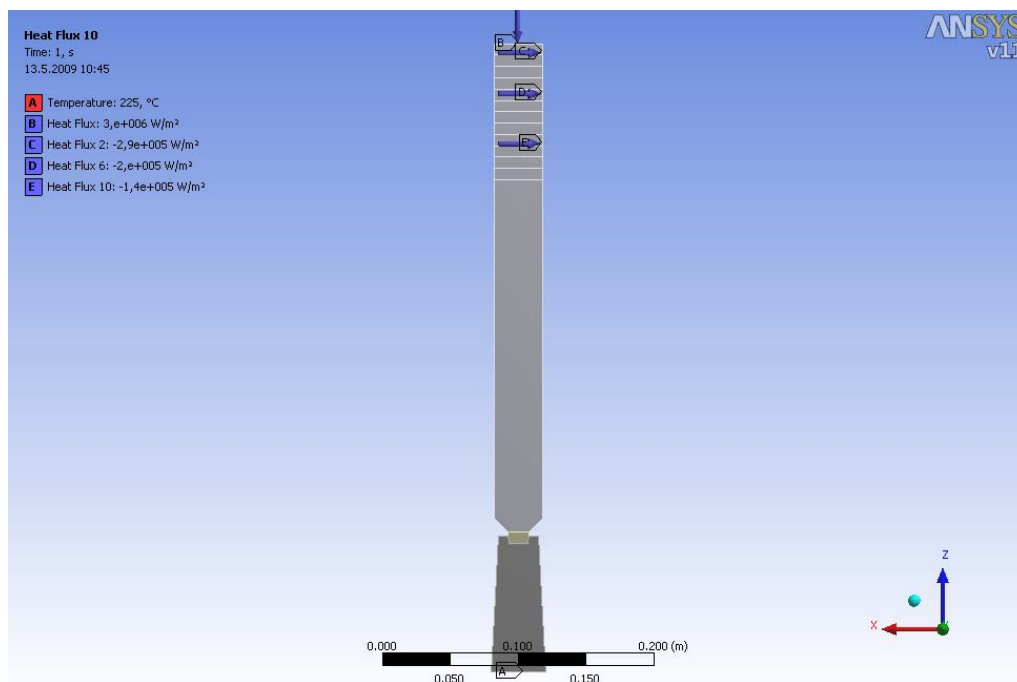
Obrázek 11 – Rozložení teplot ve W mezikusu a zárodku na začátku procesu výroby monokrystalu



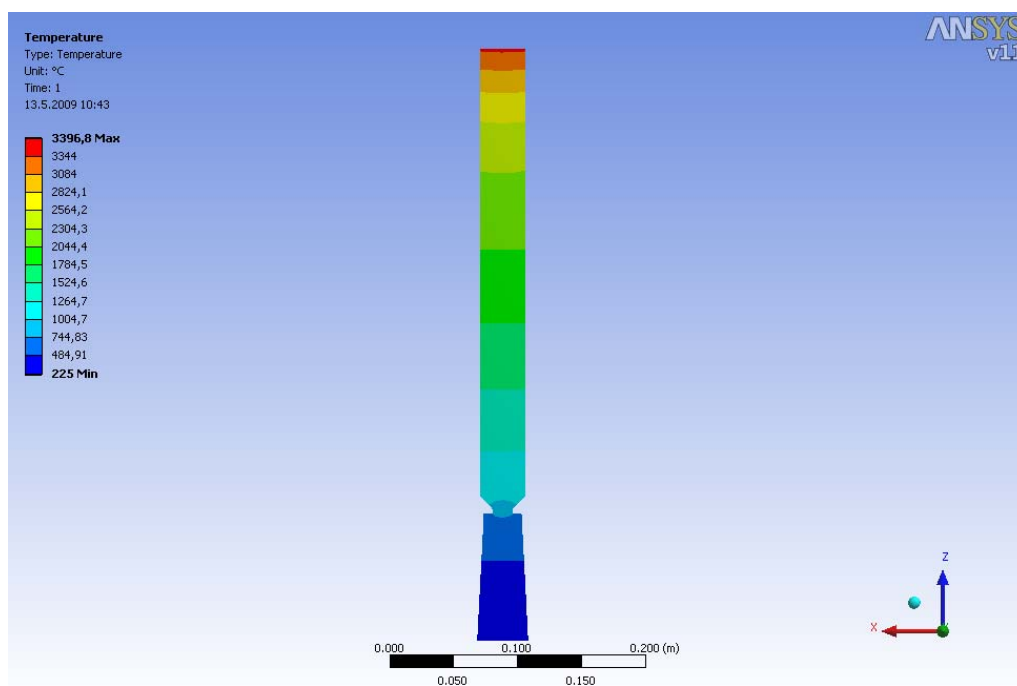
Obrázek 12 - Zjištěné hustoty tepelných toků a okrajové podmínky v průběhu procesu výroby monokrystalu



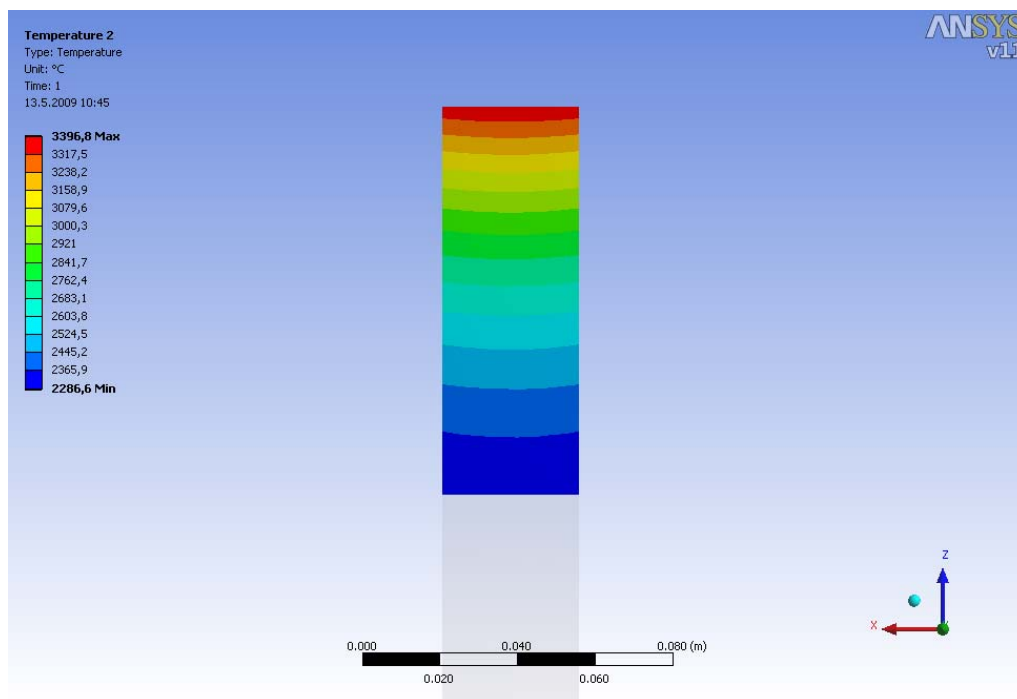
Obrázek 13 - Rozložení teplot v monokrystalu a W mezikusu v průběhu procesu výroby monokrystalu



Obrázek 14 - Zjištěné hustoty tepelných toků a okrajové podmínky na konci procesu výroby monokrystalu



Obrázek 15 - Rozložení teplot v monokrystalu a W mezikusu na konci procesu výroby monokrystalu



Obrázek 16 - Rozložení teplot v části monokrystalu v chladiči na konci procesu výroby monokrystalu

Tabulka 5 – Hustoty tepelných toků jednotlivých sekcí na začátku procesu

		Zjištěná hustota tepelného toku [W.m ⁻² .K ⁻¹]
Začátek		
SEKCE C		
	- část 1	115.10 ³
	- část 2	115.10 ³
	- část 3	115.10 ³
	- část 4	115.10 ³
SEKCE B		
	- část 1	80.10 ³
	- část 2	80.10 ³
	- část 3	80.10 ³
	- část 4	80.10 ³
SEKCE A		
	- část 1	60.10 ³
	- část 2	60.10 ³
	- část 3	60.10 ³
	- část 4	60.10 ³

Tabulka 6 - Hustoty tepelných toků jednotlivých sekcí v průběhu procesu

		Zjištěná hustota tepelného toku [W.m ⁻² .K ⁻¹]
Běh		
SEKCE C		
	- část 1	195.10 ³
	- část 2	195.10 ³
	- část 3	195.10 ³
	- část 4	195.10 ³
SEKCE B		
	- část 1	180.10 ³
	- část 2	180.10 ³
	- část 3	180.10 ³
	- část 4	180.10 ³
SEKCE A		
	- část 1	150.10 ³
	- část 2	150.10 ³
	- část 3	150.10 ³
	- část 4	150.10 ³

Tabulka 7 – Hustoty tepelných toků jednotlivých sekcí na konci procesu

		Zjištěná hustota tepelného toku [W.m ⁻² .K ⁻¹]
Konec		
SEKCE C		
	- část 1	290.10 ³
	- část 2	290.10 ³
	- část 3	290.10 ³
	- část 4	290.10 ³
SEKCE B		
	- část 1	200.10 ³
	- část 2	200.10 ³
	- část 3	200.10 ³
	- část 4	200.10 ³
SEKCE A		
	- část 1	140.10 ³
	- část 2	140.10 ³
	- část 3	140.10 ³
	- část 4	140.10 ³

2.6.2 Výpočet parametrů chladicích kanálů jednotlivých sekcí

Pro návrh parametrů chladicí soustavy bude použita bilanční rovnice, která je užívána pro výpočet parametrů výměníku tepla. V obecném tvaru má podobu:

$$P = \dot{m}_{H_2O} \cdot c_{pH_2O} \cdot \Delta t_{H_2O} = k \cdot S \cdot \Delta \bar{t} \quad [W] \quad (9)$$

, kde: P ... výkon, který je nutno odvést chlazením stěny

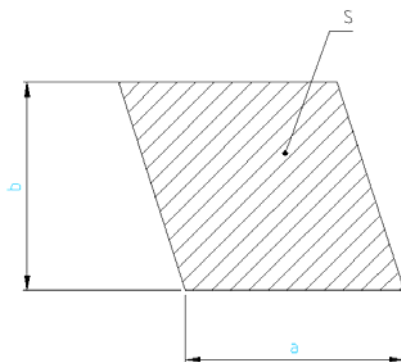
Výpočet tohoto výkonu je rozdílný pro sekci C chladiče a pro sekce A a B.

\dot{m}_{H_2O} ... hmotnostní tok chladicí vody chladicím kanálem dle vztahu:

$$\dot{m}_{H_2O} = S_{kan} \cdot w_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (10)$$

, kde: S_{kan} ... plocha průřezu kanálu, viz. Obrázek 15, podle vztahu:

$$S_{kan} = a_{kan} \cdot b_{kan} \quad [m^2] \quad (11)$$



Obrázek 17 – Plocha průřezu kanálu

w_{H_2O} ... rychlost proudění vody v kanále $[m \cdot s^{-1}]$

ρ_{H_2O} ... hustota chladicí kapaliny $[kg \cdot m^{-3}]$

c_{pH_2O} ... měrná tepelná kapacita vody v chladicím kanále $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

Δt_{H_2O} ... změna teploty vody v chladicím kanále $[K]$

k ... lineární součinitel prostupu tepla podle vztahu:

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{2.r_1.\alpha_1} + \frac{1}{2.\lambda_{st}}.\ln\frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2.r_2.\alpha_2}} \quad [W.m^{-1}.K^{-1}] \quad (12)$$

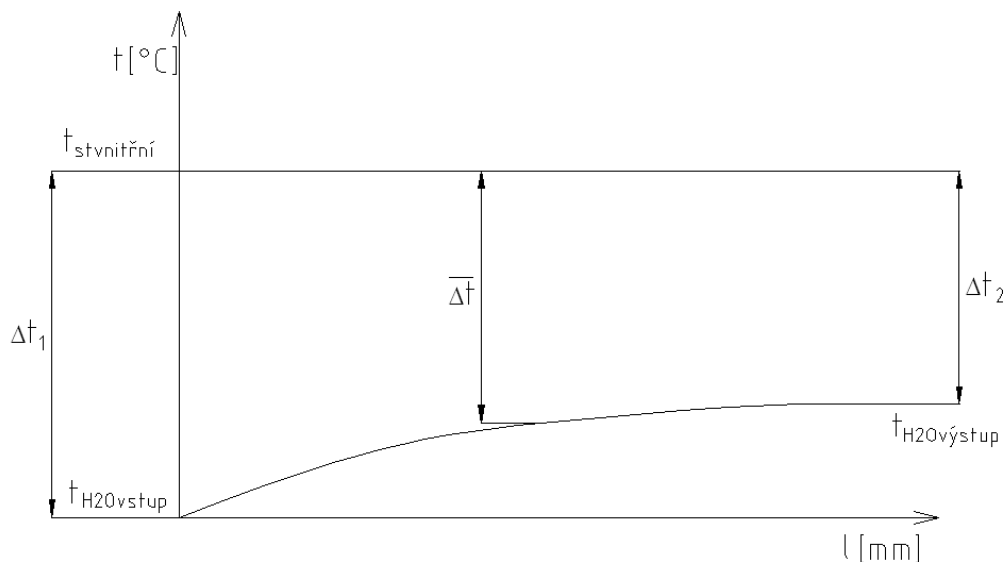
, kde: α_1 ...součinitel přestupu tepla mezi prostředím pece a stěnou chladiče $[W.m^{-2}.K^{-1}]$

λ_{st} ...součinitel tepelné vodivosti stěny $[W.m^{-1}.K^{-1}]$

α_2 ...součinitel přestupu tepla mezi stěnou a proudící chladicí kapalinou $[W.m^{-2}.K^{-1}]$

$\Delta\bar{t}$...střední teplotní spád dle vztahu:

$$\Delta\bar{t} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (13)$$



Obrázek 18 – Střední teplotní spád

Pro výpočet ohřevu vody v kanálu chladiče monokrystalu použijeme následující vztah:

$$\dot{m}_{H_2O} \cdot c_{pH_2O} \cdot \Delta t_{H_2O} = P \quad [W] \quad (14)$$

Po dosazení (9) a (10) do (14) dostáváme:

$$\Delta t_{H_2O} = \frac{P}{w_{H_2O} \cdot a_{kan} \cdot b_{kan} \cdot \rho_{H_2O} \cdot c_{pH_2O}} \quad [K] \quad (15)$$

Jak již bylo zmíněno, výpočet P je rozdílný pro sekci C chladiče a jeho zbylé sekce. V této sekci je totiž třeba odvést nejen teplo plynoucí ze simulace MKP, ale i zchladit taveninu na teplotu tavení a následně odvést skupenské teplo tuhnutí. Platí tedy:

$$P_1 = q_1 \cdot S_u + c_{pW} \cdot \dot{m}_{SC} \cdot \Delta T + \dot{m}_{SC} \cdot L_W \quad [W] \quad (16)$$

, kde: $q_1 \dots$ hustota tepelného toku zjištěná simulací MKP $[W \cdot m^{-2}]$

$S_u \dots$ ohřívání plocha uvažované sekce chladiče podle vztahu:

$$S_u = \pi \cdot d_{chl} \cdot v_u \quad [m^2] \quad (17)$$

, kde: $d_{chl} \dots$ průměr ohřívání plochy chladiče $[m]$

$v_u \dots$ výška uvažované sekce $v_u = 8,3 \text{ mm}$

$c_{pW} \dots$ měrná tepelná kapacita wolframu

$\dot{m}_{SC} \dots$ hmotnostní tok monokrystalu při procesu podle vztahu:

$$\dot{m}_{SC} = \pi \cdot \frac{d_{SC}^2}{4} \cdot \rho_W \cdot v_{TAZ} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (18)$$

, kde: $d_{SC} \dots$ průměr monokrystalu $d_{SC} = 30 \text{ mm}$

$\rho_W \dots$ hustota wolframu $\rho_W = 17600 \text{ kg} \cdot m^{-3}$

$v_{TAZ} \dots$ rychlost tažení monokrystalu

$v_{TAZ} = 5,556 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot s^{-1}$

$\Delta T \dots$ přehřátí taveniny nad teplotu tání $\Delta T = 100 \text{ K}$

$L_W \dots$ měrné skupenské teplo tuhnutí wolframu $L_W = 251,208 \text{ kJ} \cdot kg^{-1}$

Vzorový výpočet provedeme pro hustotu tepelného toku na začátku procesu.

Po dosazení (17) a (18) do (16) dostáváme:

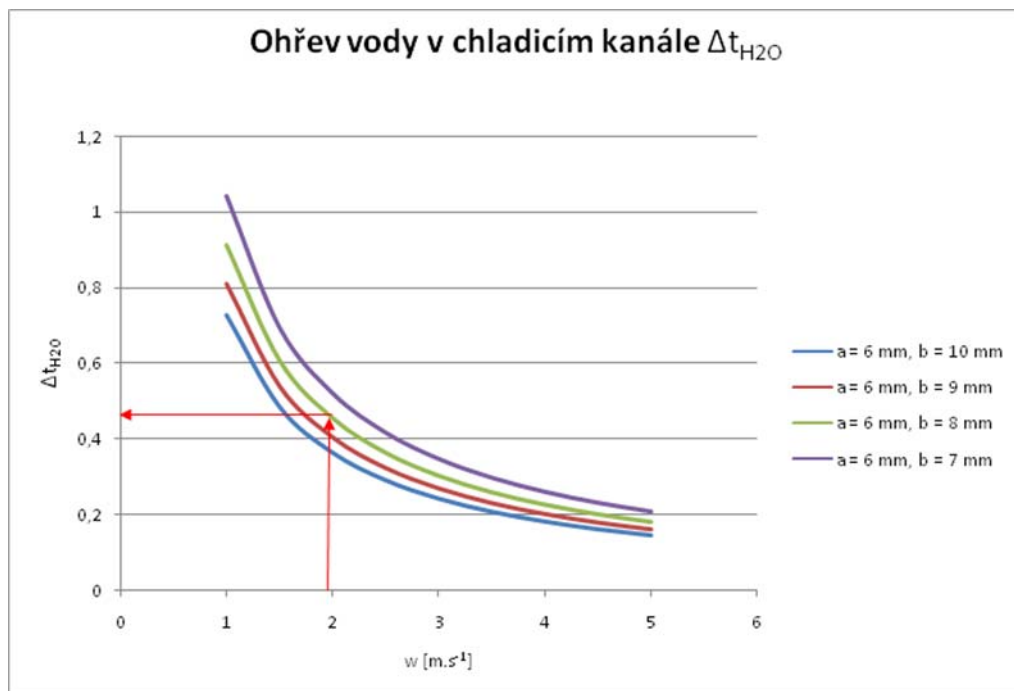
$$P_1 = q_1 \cdot \pi \cdot d_{chl} \cdot v_u + \pi \cdot \frac{d_{sc}^2}{4} \cdot \rho_W \cdot v_{TAZ} \left(c_{pW} \cdot \Delta T + L_W \right) \quad [W] \quad (19)$$

$$P_1 = 115 \cdot 10^3 \cdot 3,14 \cdot 0,068,3 + 3,14 \cdot \frac{0,03^2}{4} \cdot 17600 \cdot 5,556 \cdot 10^{-7} (168 \cdot 100 + 251208)$$

$$P_1 = 182,49 W$$

Uvažujeme (19) jako parametrickou rovnici s parametry a_{kan}, b_{kan} .

Volíme-li za proměnnou w_{H_2O} , pak můžeme tuto parametrickou závislost vyjádřit pomocí Grafu 1. Pro jeho vytvoření byly použity hodnoty uvedené v Tabulce 8:



Graf 1 – Ohřev vody v chladicím kanále sekce

Tabulka 8 – Hodnoty použité k výpočtu ohřevu vody v chladicím kanále

P_{st}	182,49 W
ρ_{H_2O}	998 kg.m ⁻³
c_{pH_2O}	4183 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹

Pro vzorový výpočet je pak uvažován kanál o rozměrech 6 mm x 9 mm a rychlost proudění chladicí vody $w_{H_2O}=1,9 \text{ m.s}^{-1}$. Po dosazení:

$$\Delta t_{H_2O} = \frac{182,49}{1,9 \cdot 0,006 \cdot 0,008 \cdot 998,4183}$$

$$\Delta t_{H_2O} = 0,479 \text{ K}$$

Při výpočtu ostatních sekcí chladiče postupujeme analogicky, avšak při výpočtu výkonu již uvažujeme pouze s hustotou tepelného toku, zjištěnou simulací MKP.

Velmi důležitým parametrem pro návrh je součinitel přestupu tepla α mezi stěnou kanálu a chladicí vodou. Tento součinitel by se neměl pohybovat nad hranicí $\alpha = 14000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Pro jeho výpočet užijeme vztah:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{H_2O}}{d_h} \quad \left[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1} \right] \quad (20)^9$$

, kde: Nu ... Nusseltovo kritérium podle vztahu:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_p} \right)^{0,25} \quad [1] \quad (21)^9$$

, kde: Re ... Reynoldsovo číslo spočteno ze vztahu:

$$Re = \frac{w_{H_2O} \cdot d_h}{\nu_{H_2O}} \quad [1] \quad (22)^9$$

, kde: d_h ... hydraulický průměr kanálu ze vztahu:

$$d_h = \frac{4 \cdot a_{kan} \cdot b_{kan}}{2 \cdot (a_{kan} + b_{kan})} \quad [m] \quad (23)$$

ν_{H_2O} ... kinematická viskozita vody $[m^2.s^{-1}]$

Pr ... je Prantlovo kritérium podle vztahu:

$$Pr = \frac{\nu_{H_2O}}{a_{H_2O}} \quad [1] \quad (24)^9$$

, kde: a_{H_2O} ... součinitel teplotní vodivosti ze vztahu:

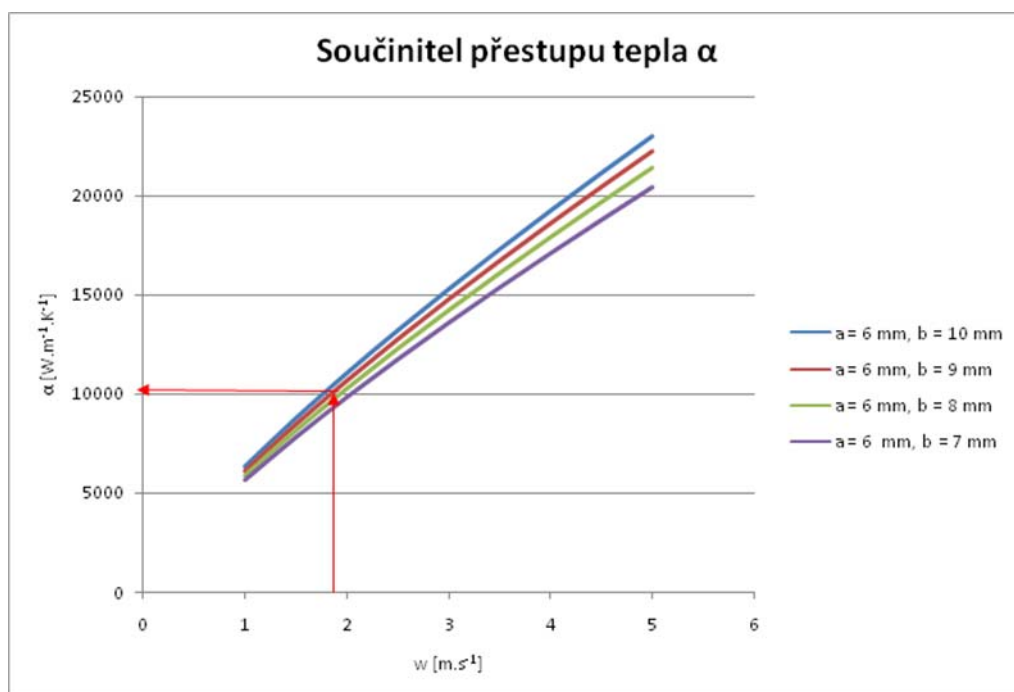
$$a_{H_2O} = \frac{\lambda_{H_2O}}{c_{pH_2O} \cdot \rho_{H_2O}} \quad [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (25)^9$$

, kde: λ_{H_2O} ...součinitel tepelné vodivosti

$$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

Pr_p ...Prantlovo kritérium spočítané pro teplotu stěny

Po dosazení (21) až (25) do (20) dostáváme další parametrickou rovnici. Opět volíme jako parametry a_{kan}, b_{kan} a jako proměnnou w_{H_2O} . Při použití dalších hodnot uvedených v Příloze IV. potom získáme závislost vyjádřenou Grafem 2.



Graf 2 – Součinitel přestupu tepla α

Vzorový výpočet byl proveden pro stejné parametry, jako u předešlého výpočtu.

Výpočet hydraulického průměru:

$$d_h = \frac{4 \cdot 0,006 \cdot 0,008}{2 \cdot (0,006 + 0,008)}$$

$$d_h = 6,857 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Výpočet Reynoldsova čísla a ověření turbulentnosti proudění

$$\text{Re} = \frac{1,9 \cdot 6,857 \cdot 10^{-3}}{1,006 \cdot 10^{-6}}$$

$$\text{Re} = 11399$$

$\text{Re} > 10000 \Rightarrow$ proudění je turbulentní.

Výpočet Prantlova kritéria pro teplotu vody

Výpočet součinitele teplotní vodivosti a

$$a_{H_2O} = \frac{0,598}{4183,998}$$

$$a_{H_2O} = 1,432 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Pr} = \frac{1,006 \cdot 10^{-6}}{1,432 \cdot 10^{-7}}$$

$$\text{Pr} = 7,978$$

Výpočet Prantlova kritéria pro teplotu stěny:

Výpočet součinitele teplotní vodivosti a

$$a_{H_2Op} = \frac{0,598}{4178,992}$$

$$a_{H_2Op} = 1,432 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Pr}_p = \frac{8,959 \cdot 10^{-7}}{1,432 \cdot 10^{-7}}$$

$$\text{Pr}_p = 6,254$$

Výpočet Nusseltova kritéria:

$$\text{Nu} = 0,021 \cdot 11399^{0,8} \cdot 7,978^{0,43} \cdot \left(\frac{7,978}{6,254} \right)^{0,25}$$

$$\text{Nu} = 95,939$$

Výpočet součinitele přestupu tepla α :

$$\alpha = \frac{95,939 \cdot 0,598}{6,857 \cdot 10^{-3}}$$

$$\alpha = 8366,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Spočtená hodnota je sice poměrně nízká, nicméně vyhovuje požadavkům na součinitel přestupu tepla α . Tato hodnota se bude zvyšovat v průběhu procesu, kdy bude nutno odvést větší množství tepla.

2.7 Návrh materiálu a tloušťky stěny chladiče monokrystalu

Pro návrh materiálu je potřeba určit teplotu chladiče a to jak na chlazené, tak na ohřívané ploše chladiče. Ta by neměla přesáhnout teplotu, kdy u zvoleného materiálu dochází ke ztrátě pevnosti. Uvažovanými materiály jsou nerezová ocel a měď.

Teplota chlazené plochy chladiče byla použita již v předchozím bodě jako předpoklad pro výpočet Pr_p . Pro výpočet skutečné teploty byl užit následující vztah:

$$P = \alpha \cdot S \cdot (t_{stvnitrni} - t_{H2O}) \quad [W] \quad (26)$$

, kde: S ... velikost ochlazované plochy kanálu podle vztahu:

$$S = S_u + \left[\frac{(d_{Chl} + 2 \cdot a_{kan})^2}{4} \pi - \frac{d_{Chl}^2}{4} \pi \right] \cdot \left(\frac{v_u}{b_{kan}} + 0,5 \right) \quad [m^2] \quad (27)$$

t_{H2O} ... střední teplota chladicí vody $[^{\circ}C]$

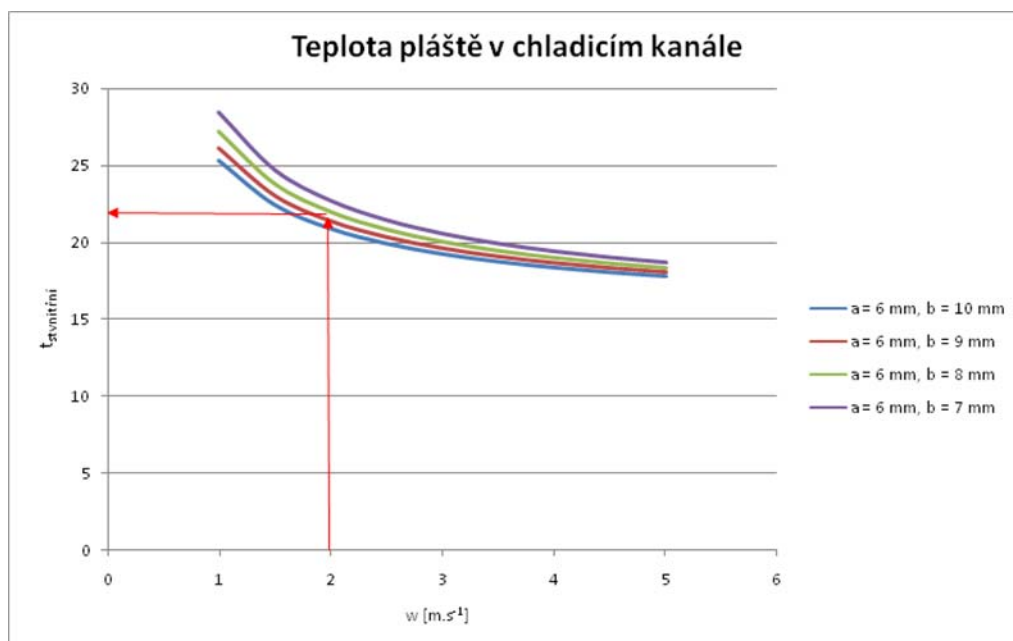
U výpočtu teplosměnné plochy předpokládáme, že stěny kanálu a_{kan} budou působit jako žebra a tím zvětší teplosměnnou plochu. Po drobné úpravě dostáváme vztah:

$$t_{stvnitrni} = \frac{P}{\alpha \cdot S} + t_{H2O} \quad [^{\circ}C] \quad (28)$$

Jak je zřejmé, opět se jedná o parametrickou rovnici. Pro jednoduchost budeme opět volit parametry stejně, jako v předchozích případech, tzn. parametry budou a_{kan} , b_{kan} a proměnná w_{H2O} . Při použití hodnot z Tabulky 5 a Přílohy III. a s přidáním hodnot uvedených v Tabulce 9 získáme Graf 3.

Tabulka 9 – Hodnoty použité pro výpočet teploty ochlazované plochy kanálu

S	$3,488 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
t_{H_2O}	15°C



Graf 3 – Teplota ochlazované plochy chladicího kanálu

Pro vzorový výpočet byly použity stejné hodnoty jako v předchozích bodech. Po dosazení do (20) tedy dostáváme:

$$t_{stvitrni} = \frac{182,49}{8366 \cdot 3,488 \cdot 10^{-3}} + 15$$

$$t_{stvitrni} = 21,25^\circ\text{C}$$

Tato teplota pláště je sice dost nižší, než bylo předpokládáných 40°C , nicméně vzhledem k tomu, že tabulkové hodnoty veličin vstupujících do výpočtu α nejsou pro menší teplotní rozdíl, než 20°C k dispozici, nebudeme výpočet měnit. Dále však již budeme počítat s teplotou stěny vevnitř chladicího kanálu podle (28), resp. Grafu 3.

Pro výpočet teploty ohřívajícího pláště byl použit následující vztah platný pro prostup tepla válcovou stěnou:

$$t_{spec} = t_{stvnitrni} + \frac{q}{\pi} \cdot \frac{1}{2 \cdot \lambda_{st}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_{Chl}} \quad [^{\circ}C] \quad (29)^{10}$$

, kde: q ... hustota tepelného toku podle vztahu:

$$q = \frac{P}{o_{st}} \quad [W.m^{-1}] \quad (30)$$

, kde: o_{st} ... obvod úseku pecní stěny

$$o_{st} = \pi \cdot d_{Chl} \quad [m] \quad (31)$$

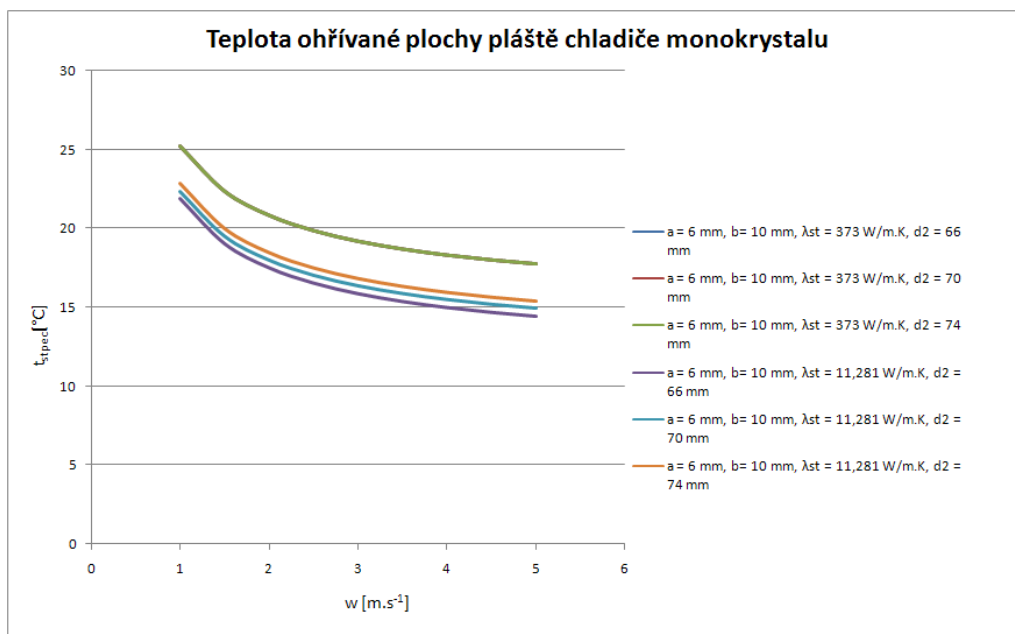
d_2 ... průměr ochlazované plochy chladiče $[m]$

Po dosazení (31) do (30) a následně do (29) dostáváme vztah:

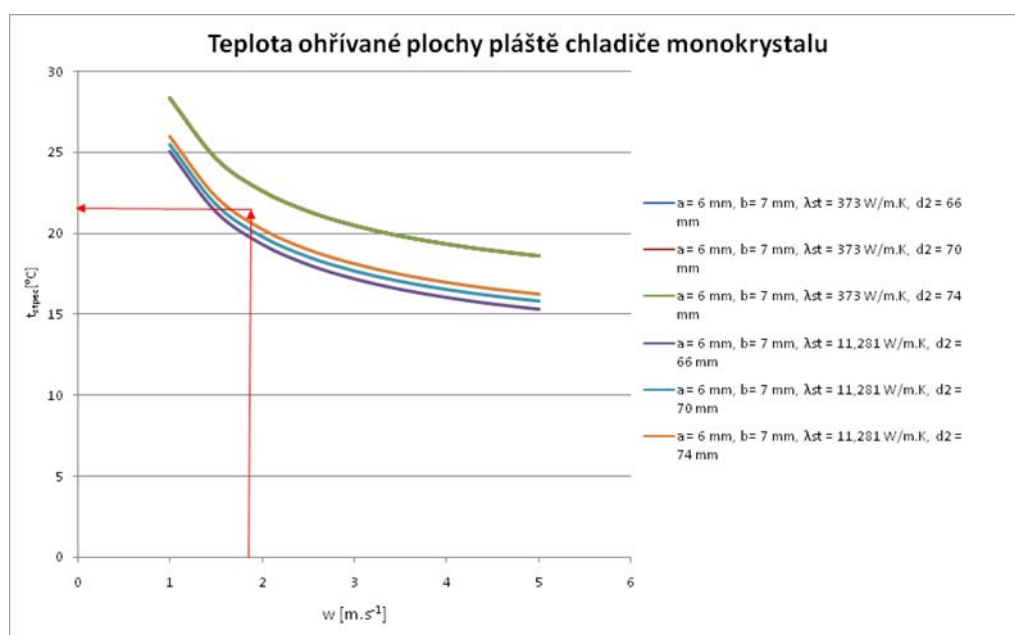
$$t_{spec} = t_{stvnitrni} + \frac{P}{\pi \cdot d_{Chl}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \lambda_{st}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_{Chl}} \quad [^{\circ}C] \quad (32)$$

Tento vztah budeme řešit opět jako parametrický, neboť je úzce spojen s předchozími výpočty. Jako parametry byly voleny volit a_{kan}, b_{kan}, d_2 a λ_{st} . Parametr d_2 v tomto případě zastupuje změnu tloušťky stěny a parametr λ_{st} změnu materiálu stěny. Jako proměnná potom bude opět w_{H2O} .

Pro informaci o průběhu teploty stěny uvnitř pecního prostoru stačí Grafy 4 a 5, které jsou sestavené pro nejmenší a největší uvažovaný průřez chladičího kanálu.



Graf 4 – Teplota ohřívání plochy pláště chladiče monokrystalu pro maximální průřez chladicího kanálu



Graf 5 – Teplota ohřívání plochy pláště chladiče monokrystalu pro minimální průřez chladicího kanálu

Pro vzorový výpočet byly použity hodnoty spočítané v předchozích vzorových výpočtech. Fyzikální parametr materiálu stěny a její tloušťka jsou uvedeny v Tabulce 10.

Tabulka 10 – Parametry stěny pro vzorový výpočet

d_2	70 mm
λ_{st}^7	11,281 W/m.K

Po dosazení do (32):

$$t_{spec} = 21,25 + \frac{182,49}{\pi \cdot 0,06} \cdot \frac{1}{2 \cdot 11,281} \cdot \ln \frac{0,07}{0,06}$$

$$t_{spec} = 21,34^\circ C$$

Jak je zřejmé z výpočtu i uvedených grafů teplota stěny v rozsahu námi volených parametrů nepřekročí povolenou mez.

Vypočtené hodnoty pro jednotlivé sekce v průběhu výroby monokrystalu jsou uvedeny v Příloze V.

2.8 Stanovení tlakových ztrát v chladicích okruzích sekcí

Stanovení třecích ztrát je důležité z hlediska výběru vhodného čerpadla.

„Ztráty třením v potrubí vznikají třením částic proudící tekutiny při rozdílných rychlostech a třením tekutiny o stěny zařízení.“¹¹

Ztráty třením v potrubí lze spočítat ze vztahu:

$$p_{ztr} = \frac{\lambda \cdot \Sigma l_i \cdot \rho_{H_2O} \cdot w_{H_2O}^2}{2 \cdot d_h} \quad [Pa] \quad (33)^{11}$$

, kde: p_{ztr} ... třecí tlaková ztráta

λ ... třecí součinitel [1]

l_i ... délka rovného úseku chladicího kanálu [m]

Stanovení třecího součinitele λ je závislé na několika faktorech. Pro oblast turbulentního proudění byl použit pro výpočet třecího součinitele vztah podle Blasia ve tvaru:

$$\lambda = 0,3164 \cdot \text{Re}^{-0,25} \quad [1] \quad (34)^{11}$$

, který má platnost pro $\text{Re} < 8 \cdot 10^4$.

„Místní odpory, neboli místní ztráty, vznikají v krátkých úsecích potrubí, kde dochází ke změně charakteru proudu, tj. velikosti rychlosti a směru proudu, případně k obojímu.“¹¹

V případě chladiče se tento druh místní ztráty vyskytuje ve tvarovkách. Jsou to 90° kolena, jak oblá v přívodní a odvodní části, tak i ostrá, za které lze považovat změnu směru proudění v místě, kde voda vstupuje, resp. vystupuje s prostoru chladiče, a změny průřezu kanálu, které jsou v místě připojení chladiče na přívodní a odvodní větev.

Místní ztráta byla spočítána ze vztahu:

$$p_{zm} = \zeta_m \cdot \frac{w_{H_2O}^2 \cdot \rho_{H_2O}}{2} \quad [Pa] \quad (35)^{11}$$

, kde: p_{zm} ... místní tlaková ztráta

ζ_m ... součinitel místní ztráty [1]

Hodnoty součinitelů místní ztráty jsou pro jednotlivé případy uvedeny v Tabulce 11:

Tabulka 11 – Hodnoty součinitele místních ztrát chladiče monokrystalu

Hodnoty součinitelů místních ztrát	
Prvek	ζ_m
Koleno 90° oblé	0,4
Koleno 90° ostré	1,2
Změna průřezu kanálu	
- trubka - stěna	0,563
- stěna - kanál sekce C	0,727
- stěna - kanály sekcí A a B	0,788

Celková tlaková ztráta je pak součtem třecích a místních tlakových ztrát v chladicím okruhu podle vztahu:

$$p_{zC} = \sum p_{ztr} + \sum p_m \quad [Pa] \quad (36)$$

Tabulka pro výpočet celkové třecí ztráty v sekci C na začátku procesu je uvedena jako Příloha VI.

Celková třecí ztráta v chladicím okruhu sekce C na začátku procesu je tedy po dosazení do (36):

$$p_{zC} = 959,96 + 3.59,99 + 12163,35 + 1319,94 + 3.5,66 + 2.14,85 + 2.41,13$$

$$p_{zC} = 14,752 \text{ kPa}$$

Tato tlaková ztráta se však bude měnit společně se změnou rychlosti proudění chladicí vody. Všechny celkové tlakové ztráty v chladiči monokrystalu po dobu procesu výroby jsou uvedeny v Tabulce 12 a byly získány výpočtem analogickým ke vzorovému.

Tabulka 12 – Tlakové ztráty v chladiči monokrystalu

	p _{zC}	
ZAČÁTEK		
Sekce A	7,34	kPa
Sekce B	9,48	kPa
Sekce C	14,75	kPa
BĚH		
Sekce A	10,04	kPa
Sekce B	12,41	kPa
Sekce C	23,86	kPa
KONEC		
Sekce A	6,98	kPa
Sekce B	13,41	kPa
Sekce C	43,03	kPa

Vypočtené hodnoty potvrzují předpokládané zvyšování tlakových ztrát během procesu výroby monokrystalu.

3 Podavač vsázky

Podavač vsázky představuje důležitý a komplikovaný konstrukční uzel zařízení pro výrobu monokrystalu. Vzhledem k povaze procesu je nutné, aby umožňoval velmi přesné řízení dodávání vsázky a dále je důležitá jeho teplotní odolnost vzhledem k velmi vysoké teplotě tavení vsázky.

Vsázka bude mít podobu wolframových tyčí o průměru $\phi d_{vs} = 10 \text{ mm}$.

3.1 Požadavky na funkci, bezpečnost, diagnostiku a řízení

Z funkčních požadavků je nejdůležitějším aspektem možnost přesného řízení dodávání vsázky do osy plazmového hořáku. Vzhledem k návaznosti na autorovu bakalářskou práci¹, kde již byl podobný problém řešen, bylo předem dáno, že tuto funkci bude plnit lineární aktuátor.

Další z funkčních požadavků je zabránění kontaminace vsázky. Vsázka vstupující do výroby je již velmi čistý wolfram a při jeho znečištění by došlo ke zmaření celé výroby monokrystalu a tím i k finanční újmě.

Proces výroby vyžaduje omezení rázů na minimální možnou úroveň, jak již bylo zmíněno dříve. Vzhledem k rozměrům vsázky a požadovaným rozměrům vyrobeného monokrystalu je potřeba přetavit 3063 mm vsázky. Pro zmenšení celkových rozměrů zařízení je tedy vhodné vsázku dále dělit. Proto ji bude nutné během procesu výroby vyměnit. Při návrhu konstrukce umožňující výměnu vsázky je tedy nutno přihlédnout k požadavku na minimalizaci rázů během procesu výroby monokrystalu.

Bezpečnostní požadavky jsou zde spojeny především s chlazením podavače, které zajistí jeho povrchovou teplotu na úrovni hygienických předpisů a zmenšení možnosti styku s pohyblivou částí podavače.

Požadavky na diagnostiku a řízení jsou potom spjaté s přesným určením polohy vsázky a s měřením účinnosti chlazení podavače.

Tyto požadavky jsou seřazeny v požadavkovém listu⁸, viz. Tabulka 13.

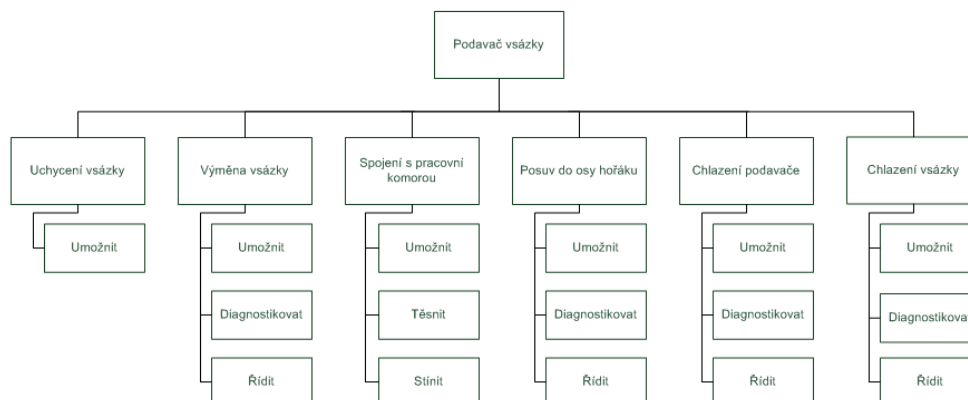
Tabulka 13 – Požadavkový list podavače vsázky

Požadavek	Nutnost	Možnost
Spojení vsázky s pohybovým šroubem		
Snadné spojení a rozpojení		X
Spojení a rozpojení bez rázů	X	
Nízká cena		X
Teplotní odolnost	X	
Zásobník vsázky		
Uchycení vsázky, která není v procesu krystalizace	X	
Bezrázová výměna vsázky	X	
Automatické nastavení vsázky do výchozí polohy pro spojení	X	
Chlazení vsázky v prostoru podavače		
Udržení teploty pod teplotou podporující creep konstrukce	X	
Udržení teploty na úrovni umožňující použití levnějších konstrukčních materiálů v co nejširší míře		X
Vedení vsázky v prostoru podavače		
Zajištění pozice v ose otvoru	X	
Zajištění pozice proti pohybovému šroubu	X	
Chlazení vsázky		X

3.2 Funkční struktura

Jak je zřejmé z porovnání rozsahu požadavkových listů chladiče monokrystalu a podavače vsázky, je podavač vsázky mnohem složitější konstrukční uzem. Jeho funkční struktura je uvedena vzhledem k jeho velikosti jako Příloha VII.

Pro přehled funkcí je uveden alespoň hierarchický funkční strom, viz. Obrázek 19.



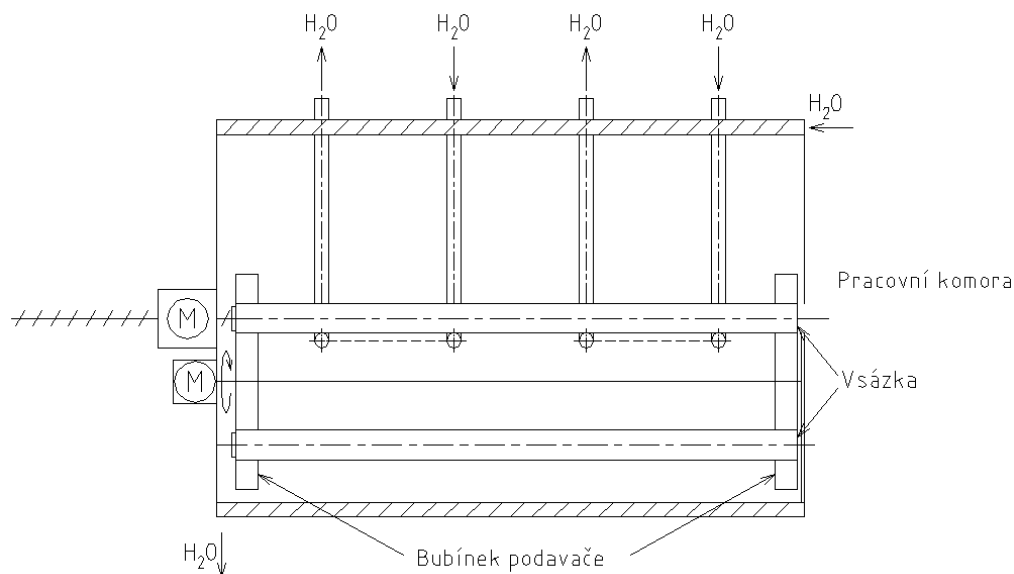
Obrázek 19 – hierarchický funkční strom podavače vsázky

3.3 Hrubá stavební struktura

Analogickým postupem, jako tomu bylo u chladiče monokrystalu, byla sestavena hrubé stavební struktura. Jako první krok je opět nutno sestavit morfologickou matici. Je uvedena jako Příloha VIII.

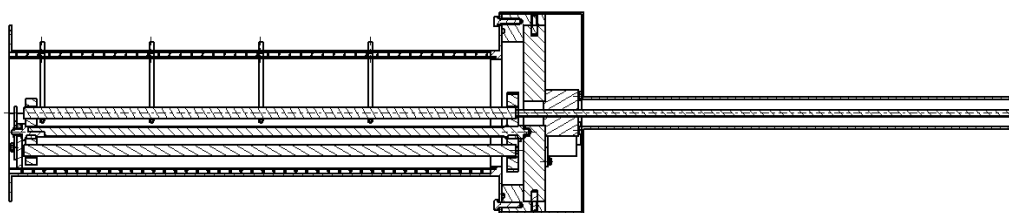
V morfologické matici je vybráno následující řešení: vsázka bude umístěna v bubínku podavače ve formě 4 tyčí, které budou v bubínku upevněny pomocí magnetů přilepených na vsázku. Pro výměnu vsázky, tzn. otočení bubínku, bude použit rotační krokový motor plně říditelný pomocí PC. Podavač bude spojen s pracovní komorou pomocí příruby a spoj bude utěsněn plochým těsněním. Pro minimalizaci tepelného toku do podavače bude otvor ve stěně komory minimalizován. Vsázka pak bude do místa tavení vtlačována pomocí pohybového šroubu lineárního aktuátoru. Poloha vsázky pak bude diagnostikována a řízena softwarem od výrobce pohonu. Prostor podavače bude chlazen systémem vody proudící mezi dvěma plášti. Vsázka bude chlazená zčásti pláštěm podavače, to se týká tepla odevzdaného radiací, a zčásti chlazením vedením. Oba tyto chladicí okruhy budou napojeny na jeden diagnostický a řídicí systém.

Výsledná orgánová struktura je na Obrázku 20.



Obrázek 20 – Orgánová struktura podavače vsázky

Hrubá stavební struktura je pak na Obrázku 21.



Obrázek 21 – Hrubá stavební struktura podavače vsázky

Vsázka bude před plněním upravena následujícím způsobem: bude nadělena na délku 450 mm a na jeden z jejích konců bude přilepen magnet. Vsázka bude umístěna do podavače ještě před přimontováním aktuátoru na přírubu a podavače jako celku na pec.

Čep spojující přední a zadní bubínek je dělený. Při plnění zásobníku bude odmontována příruba nesoucí krokový rotační motor, společně se soukolím tvořícím zároveň přední bubínek a částí čepu spojujícího oba bubínky. Vsázka bude zasunuta do předního bubínku, kde bude držet magnetickou silou. Poté bude celá příruba pomocí šroubů opět upevněna do podavače.

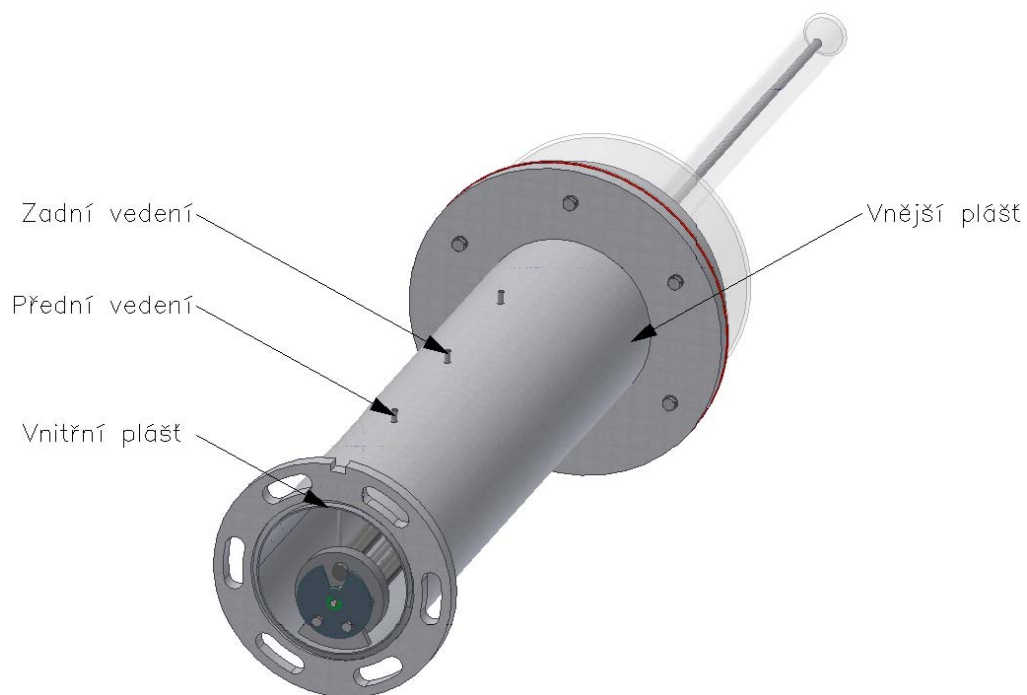
Po naplnění podavače bude přimontován aktuátor a podavač bude připevněn na pec. Po zažehnutí plazmového plamene bude přivedena vsázka do osy hořáku vysouváním pohybového šroubu aktuátoru, čímž započne samotný proces tvorby monokrystalu. Podle rychlosti tažení bude upravována rychlost posuvu vsázky do plamene. Aktuátor umožní i variantu, při níž bude vsázka v plazmě jen na okamžik nutný k natavení jejího konce a ukápnutí wolframu a poté bude vtažena zpět do prostoru podavače. Řízení rychlosti posuvu vsázky v závislosti na rychlosti tažení bude u tohoto řešení o to snadnější, že pohon tažné části zařízení, navržené v autorově bakalářské práci, je od stejného výrobce s možností připojení k jedinému řídicímu modulu s připojením k počítači.

Po spotřebování využitelného množství bude zbytek vsázky stažen zpět do prostoru podavače. Po úplném zasunutí zbytku do podavače vsázka v malé rychlosti dosáhne tvarového dorazu na předním bubínku. Pohybový šroub aktuátoru bude dále zasouván, čímž dojde k jeho oddělení od vsázky. Magnet zafixuje použitou vsázku v předním bubínku a rotační krokový motor otočí bubínkem o 90°. Nová vsázka se tak dostane do osy pohybového šroubu a opře se o vedení. Pohybový šroub aktuátoru se vysune a pomocí magnetu se s ní spojí. Celý cyklus se tím uzavře a takto připravená vsázka bude použita pro krystalizaci.

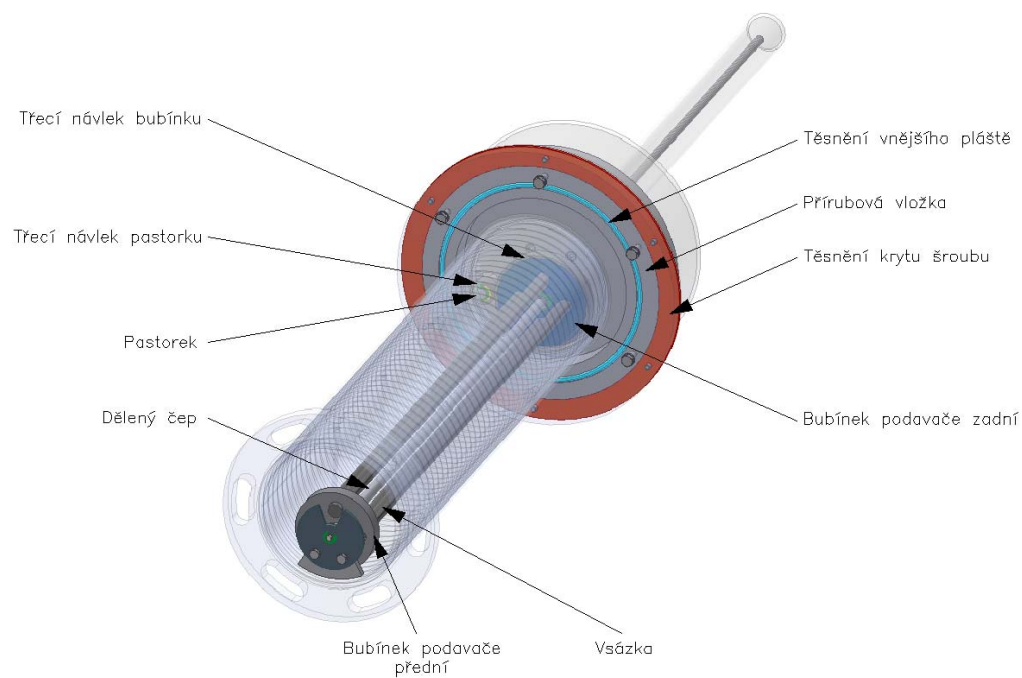
Vsázka používaná ke krystalizaci bude chlazena po celou dobu radiací pláštěm podavače a vodním chlazením vedení.

3.4 Úplná stavební struktura

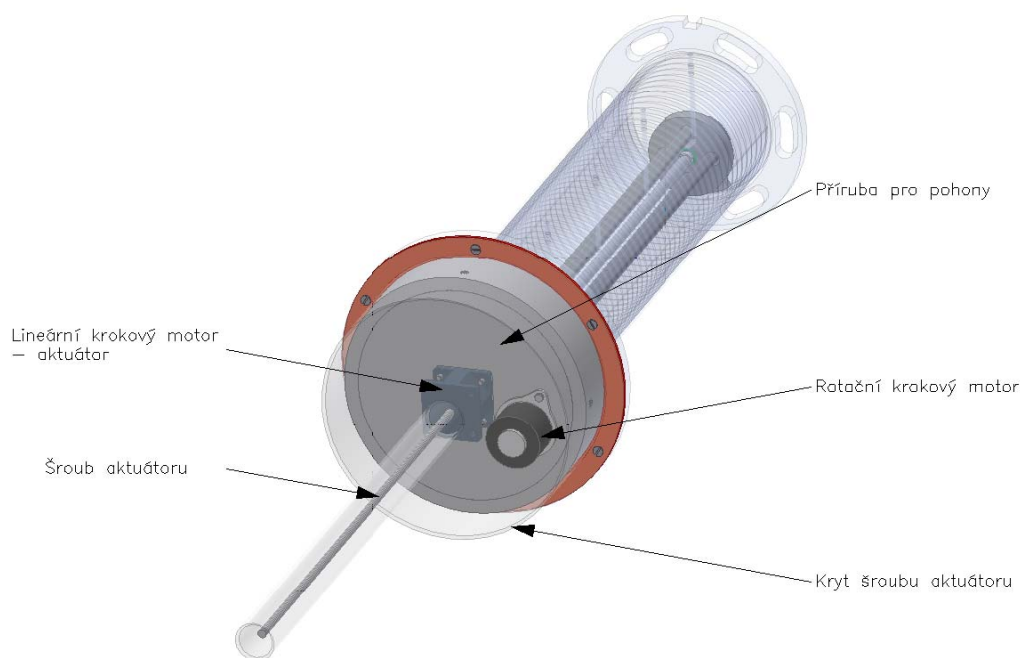
Úplná stavební struktura⁸ je již konkrétním konstrukčním návrhem zpracovaným do nejmenších detailů. Jako její zobrazení tedy nejlépe poslouží sestavný výkres. Pro tuto zprávu je uvedena ve formě modelu podavače na obrázcích 22 -24.



Obrázek 22 – Úplná stavební struktura podavače vsázky, pohled 1



Obrázek 23 – Úplná stavební struktura podavače vsázky, pohled 2



Obrázek 24 – Úplná stavební struktura podavače vsázky, pohled 3

3.5 Výpočtová část návrhu podavače vsázky

Také u podavače vsázky byla důležitou částí návrhu simulace MKP. Bylo potřeba ověřit teplotu ve styku vsázky s chlazeným vedením a určit minimální dosažitelný odpad. Teplota ve styku přímo ovlivňuje výběr konstrukčního materiálu chlazeného vedení. Pro určení minimálního dosažitelného odpadu je limitující podmínkou teplota na styku s vsázkou s magnetem. Při překročení jisté hranice totiž u magnetů dochází k demagnetizaci, v důsledku čehož by mohlo dojít k oddělení vsázky od šroubu aktuátoru. Tato hranice se liší podle materiálu magnetu. Při simulaci jsme uvažovali jako mezní teplotu $t_{mez} = 250$ °C.

Pro konstrukci vedení byla vybrána jako konstrukční materiál měď pro její vynikající schopnost vést teplo. Její nevýhodou je však její poměrně malá odolnost vůči teplotám. Maximální teplota mědi, kterou při jejím použití v konstrukci budeme uvažovat, je 250°C. Fyzikální vlastnosti mědi jsou uvedeny v Příloze IX.

Vzhledem k celkovému výkonu chlazení radiací pláštěm podavače se ukázalo jako zbytečné chladit i zadní vedení vsázky. Největší chladicí výkon je totiž potřeba umístit co nejbližší peci, aby byl zbytek vsázky co nejmenší. Kvůli tomuto požadavku je chladicí výkon předpokládán na předním vedení dostatečný pro zchlazení vsázky na úroveň, pro kterou již není potřebné další chlazení. Předpokládaná výše teploty vsázky na přední části vedení bude kolem 800°C.

Výpočet tepelného toku vychází z teorie sdílení tepla. Pro přenos tepla mezi vsázkou a vodou ve vedení musí platit vztah:

$$P = \alpha \cdot (t_{VS} - t_{H_2O}) \cdot S_{VS-ve} \quad [W] \quad (37)^7$$

$$\text{, kde: } \alpha = C \cdot \frac{(\rho_{H_2O} \cdot w_{H_2O})^{0,8}}{d_h^{0,2}} \text{ je součinitel přestupu tepla } [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (38)^7$$

, kde: $C \dots$ je konstanta závislá na teplotě chladicí kapaliny [1]

$t_{VS} \dots$ je povrchová teplota vsázky v místě styku s vedením [K]

$t_{H_2O} \dots$ je střední teplota chladicí kapaliny ve vedení [K]

$S_{VS-ve} \dots$ je plocha styku vsázky s vedením [mm²]

Tento výpočet však nelze řešit analyticky, protože jako jeden ze vstupních parametrů v něm figuruje povrchová teplota vsázky. Ta je však ovlivněna funkcí celého chladicího systému podavače. Proto bude tento výpočet prováděn jako kontrolní.

3.5.1 Simulace rozložení teploty ve vsázce MKP

Pro potřeby simulace pomocí MKP je potřeba mít přibližnou vstupní hodnotu, kterou by bylo možno použít. Ta bude získána z následujícího vztahu:

$$q = \frac{P}{S_{VS-ve}} = \alpha \cdot (t_{VS} - t_{H_2O}) \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (39)^7$$

Při výpočtu jsme pak vycházeli ze vstupních hodnot uvedených v Tabulce 14.

Tabulka 14 – Parametry použité k výpočtu okrajové podmínky

Parametr	Označení/Jednotka	Hodnota
Povrchová teplota vsázky	$t_{VS} / ^\circ\text{C}$	1100
Střední teplota vody	$t_{H_2O} / ^\circ\text{C}$	20
Rychlost proudění vody	$W_{H_2O} / \text{m.s}^{-1}$	3
Hydraulický průměr	d_h / m	0,004

Pro tyto hodnoty pak vychází:

$$\alpha = 6,0738 \cdot \frac{(998.3)^{0,8}}{0,004^{0,2}}$$

$$\alpha = 11067,51 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$$

$$q = 8475 \cdot (800 - 40)$$

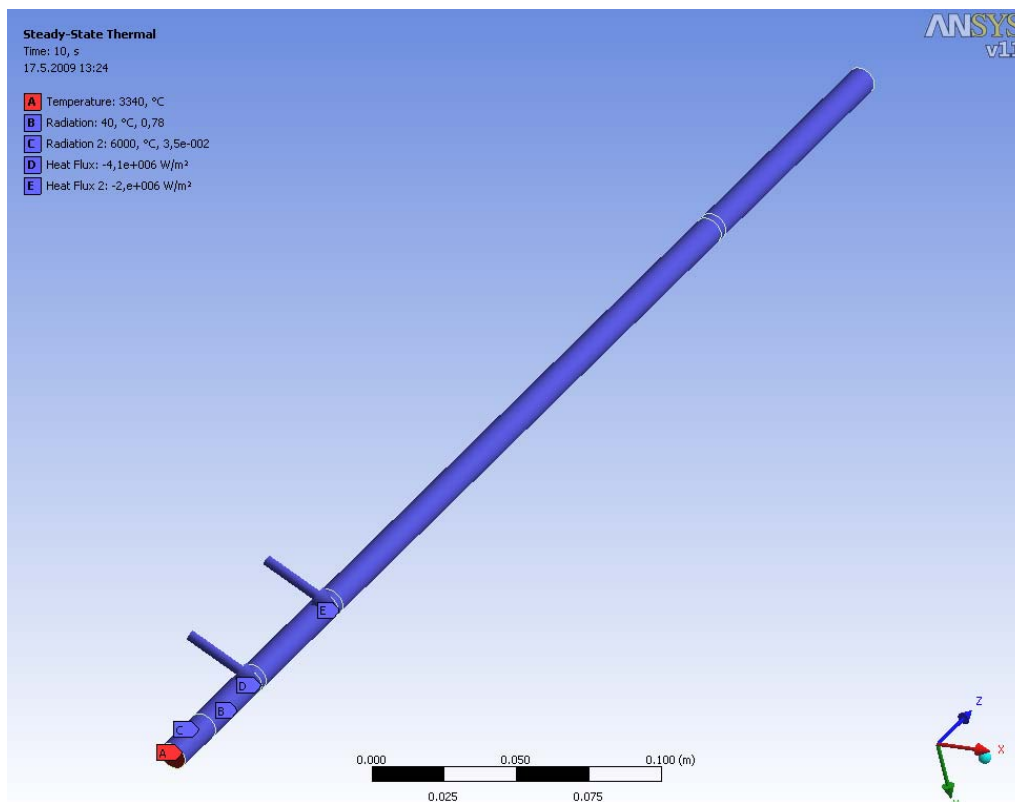
$$q = 8,41 \cdot 10^6 \text{ W.m}^{-2}$$

Tato hodnota byla použita jako výchozí pro simulaci ohřevu, resp. chlazení vsázky vedením.

Vzhledem k jednoduchému tvaru vsázky by bylo možné celou úlohu řešit jako 2-D. Protože však aplikace okrajových podmínek není osově symetrická, byla úloha řešena jako 3D. V místech aplikace okrajových podmínek a na rozmezí výsledkových oblastí, byla konečnoprvková síť zjemněna.

Vzhledem k užití podavače je převládajícím druhem zatížení teplo. Teplo bude přiváděno na část trčící z podavače do prostoru pece radiací od plazmového plamene. Přepokládali jsme teplotu plamene ve výši 6000 °C. Dále bylo předpokládáno, že vnitřní plášť podavače a vedení vsázky budou chlazeny vodou. U obou zmiňovaných částí byla zadána jako konstrukční materiál měď, kvůli jejím vynikajícím tepelným vlastnostem. Chlazený plášť bude odebírat teplo ze vsázky radiací a chlazené vedení konvekci. U pláště byl použit pro první výpočet teplotu měděné stěny 40 °C. U chlazeného vedení uvažuju tepelný tok ve výši 4 100 000 W.m⁻² u předního vedení a 2 050 000 W.m⁻² u zadního vedení. Konec vsázky bude mít teplotu tavení, která je pro wolfram 3340 °C.

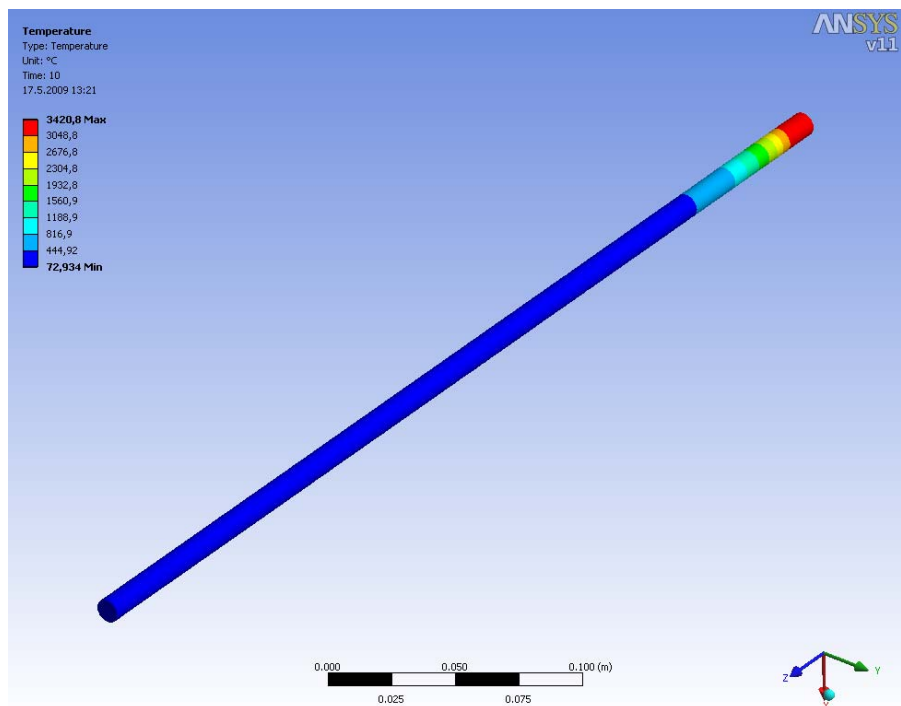
Aplikace okrajových podmínek je zřejmá z následujícího Obrázku 25.



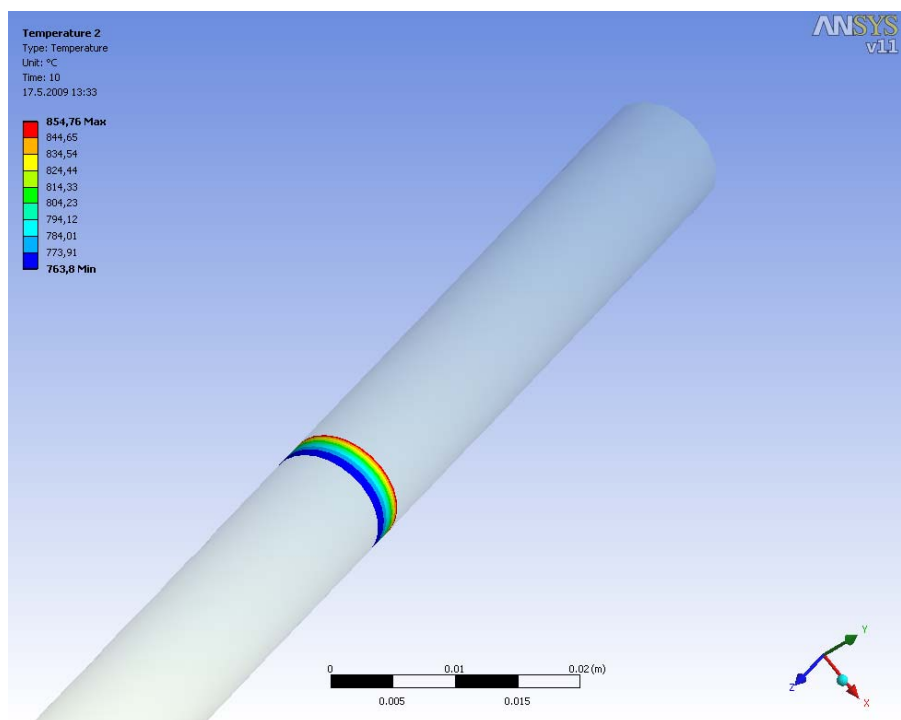
Obrázek 25 – Aplikace okrajových podmínek na vsázku o délce 450 mm

Byly použity stejné materiálové vlastnosti wolframu, jako tomu bylo u simulace pro potřeby chladiče monokrystalu.

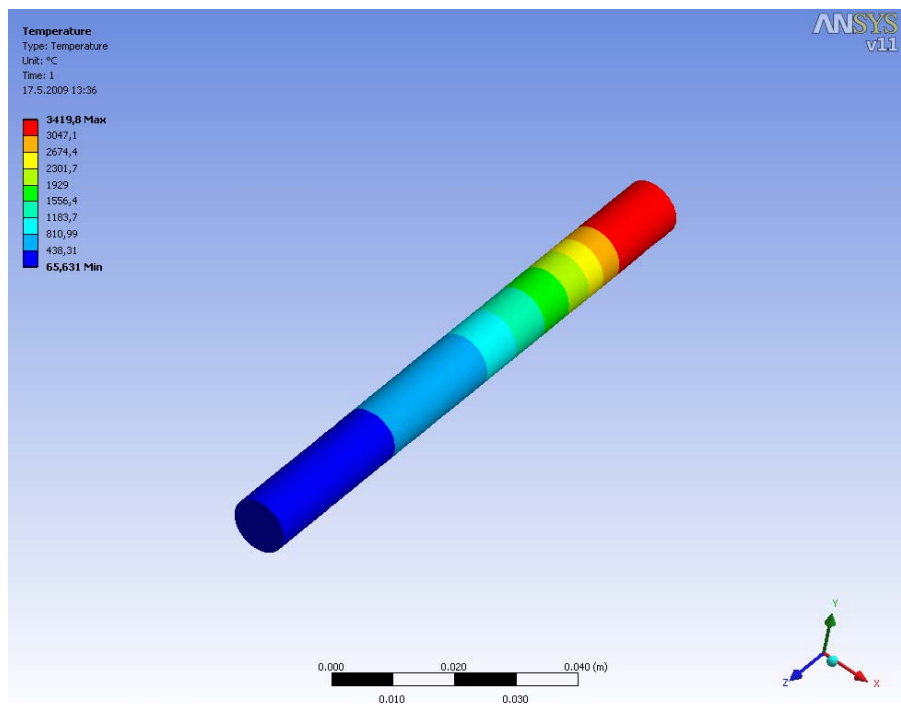
Z výsledků jsou uvedeny jenom ty, které odpovídají začátku a konci proces, a to z kapacitních důvodů. Obrázky s ostatními výsledky jsou součástí přiloženého CD.



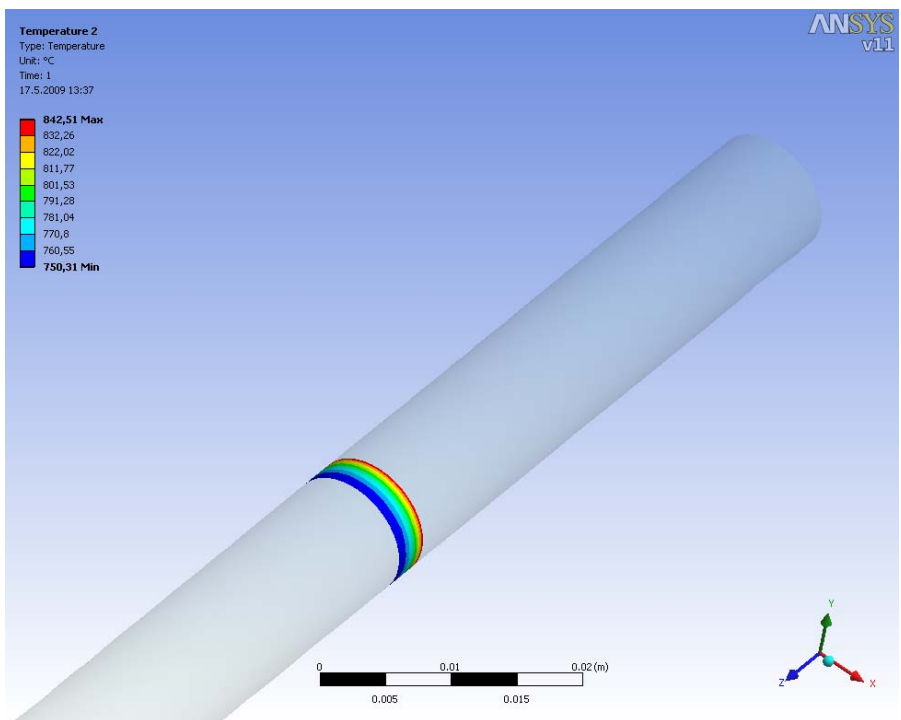
Obrázek 26 – Rozložení teplot ve vsázce na začátku procesu výroby monokrystalu



Obrázek 27 – Rozložení teplot v místě styku vsázky s chlazeným vedením na začátku procesu výroby monokrystalu



Obrázek 28 – Rozložení teplot ve vsázce na konci procesu výroby monokrystalu



Obrázek 29 - Rozložení teplot v místě styku vsázky s chlazeným vedením na konci procesu výroby monokrystalu

Z výsledků jednotlivých výpočtů plynou následující závěry:

- Vsázka bude dostatečně vychlazena, tzn. radiace od plazmového plamene, při dodržení zadaných tepelných toků, nezpůsobí roztavení vsázky před dosažením osy krystalu.
- Jako materiál zadního, vodou chlazeného, vedení může být použita měď, protože teploty na jeho povrchu nepřesáhnou 250 °C.
- U předního vedení naopak měď použít nelze, neboť teploty na styčné ploše se vsázkou se pohybují v rozmezí 750 – 850 °C i při uvažovaném chlazení. Tyto teploty by měď nevydržela. Jako konstrukční materiál se nabízí wolfram, který je vůči těmto teplotám odolný. Použití jiného materiálu by mohlo být problematické, protože veškeré nečistoty by se z něj přenesly do vznikajícího monokrystalu, který by zcela znehodnotily.
- Minimální délka odpadu po operaci bude 100 mm, protože teplotu 450 °C při délce 75 mm vsázka překročí a tím pádem by došlo ke ztrátě magnetické síly.

3.5.2 Výpočet chladicího okruhu podavače vsázky

Na plášť podavače bude působit jako zdroj tepla vsázka a to radiací. Jak je zřejmé z výsledků, bude záření výrazné zejména na části vsázky o délce 80 mm, kde střední teplota bude asi 1632°C. Z tohoto údaje pak lze spočítat při znalosti materiálu vnitřního pláště podavače tepelný tok předaný plášti podle vztahu:

$$Q_r = \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi_{1,2} \cdot S_p \quad [W] \quad (40)^{10}$$

, kde: ε_n ... složená emisivita ze vztahu:

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \cdot \frac{S_1}{S_2}} \quad [1] \quad (41)^{10}$$

, kde: $\varepsilon_1, \varepsilon_2$...emisivity jednotlivých povrchů [1]

S_1, S_2 ...plochy jednotlivých povrchů [m^2]

C_0 ...součinitel vyzařování černého tělesa $C_0 = 5,67 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$

$\varphi_{1,2}$...index směrovosti, pro náš případ $\varphi_{1,2} = 1$

S_p ...plocha zářícího povrchu vsázky $[m^2]$

Pro výpočet uvažujeme parametry uvedené v Tabulce 12.

Tabulka 15 – Vstupní hodnoty pro výpočet hustoty tepelného toku podavače vsázky

T_1	1904,95 K
T_2	313,15 K
d_1	10 mm
d_2	114 mm

Po dosazení do (41) dostáváme:

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{0,31} + \left(\frac{1}{0,78} - 1 \right) \cdot \frac{0,001^2}{0,114^2}}$$

$$\varepsilon_n = 0,310$$

Po dosazení do (40) vyjde hodnota tepelného toku:

$$P_r = 0,310 \cdot 5,67 \cdot \left[\left(\frac{1904,95}{100} \right)^4 - \left(\frac{313,15}{100} \right)^4 \right] \cdot 1,3,142 \cdot 10^{-3}$$

$$P_r = 722,15 W$$

Na tento výkon je tedy nutno dimenzovat chladicí okruh podavače vsázky.

Pro samotný výpočet chladicího okruhu podavače vsázky bude použit postup podobný s postupem návrhu chladiče monokrystalu. Beze změn lze použít vztahy (9) až (15), (20) až (25) a (28) až (32). Ve vztahu (26) je potřeba nahradit výpočet ochlazované plochy následujícím vztahem:

$$S = (2 \cdot a_{kan} + b_{kan}) \cdot l_{kan} \quad [m^2] \quad (42)$$

, kde: l_{kan} ...délka chladicího kanálu v daném úseku $[m]$

Vstupní hodnoty pro tento výpočet pro podavač vsázky jsou uvedeny v Tabulce 16 a spočítané hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 17.

Tabulka 16 – Parametry chladicího okruhu podavače vsázky

Parametr	Označení/jednotka	Hodnota
Šířka chladicího kanálu	a_{kanp}/m	0,01
Výška chladicího kanálu	b_{kanp}/m	0,004
Hydraulický průměr chladicího kanálu	d_{hp}/m	0,0057
Rychlost proudění vody	$w_{H2Op}/m.s^{-1}$	2,5
Délka chladicího kanálu	l_{kanp}/m	1,5
Teplota vody na vstupu do chladicího okruhu podavače	$t_{kH2Op}/^{\circ}C$	15
Průměr ochlazované plochy pláště podavače	d_{2p}/m	0,144
Součinitel přestupu tepla stěny podavače	$\lambda_{stp}/W.m^{-1}.K^{-1}$	11,281

Délka chladicího kanálu podavače l_{kanp} byla odměřena na 3D modelu v programu Autodesk Inventor Professional 2009.

Tabulka 17 – Vypočítané hodnoty chladicího kanálu pláště podavače vsázky

Počítaná hodnota	Označení/jednotka	Hodnota
Ohřátí vody v chladicím kanále	$\Delta t_{H2Op}/^{\circ}C$	1,966
Součinitel teplotní vodivosti	$\alpha_p/W.m^{-1}.K^{-1}$	13434,7
Reynoldsovo kritérium	$Re/1$	10999,7
Teplota ochlazovaného povrchu stěny podavače	$t_{stvnitrip}/^{\circ}C$	18,67
Teplota zahřívání povrchu stěny podavače	$t_{stvnejsip}/^{\circ}C$	19,05

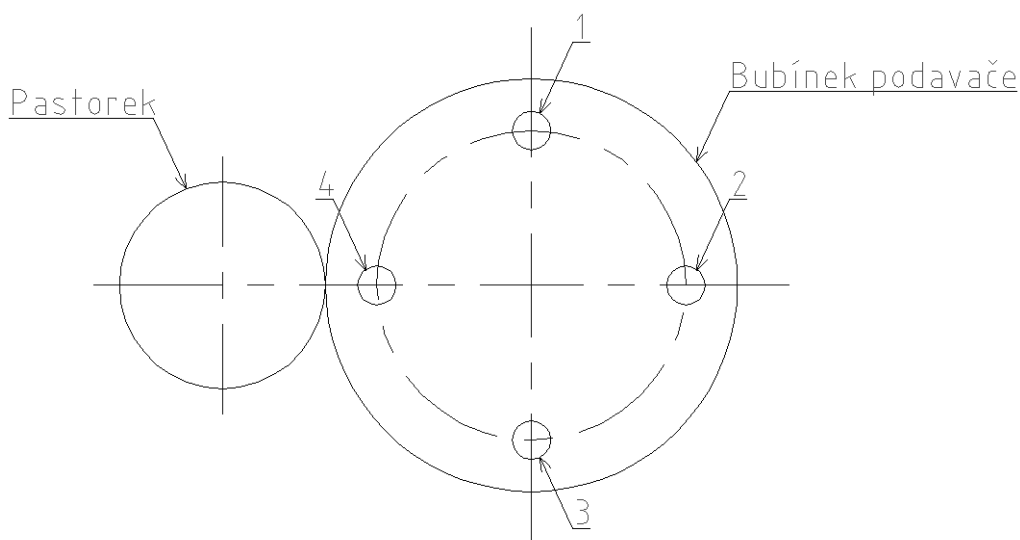
3.6 Stanovení tlakové ztráty v chladicím okruhu podavače

Při stanovení tlakové ztráty v chladicím okruhu podavače jsme vycházeli z předpokladu, že chlazené vedení i chladicí okruh pláště mají samostatné škrtící ventily. Toto řešení umožňuje kromě nezávislé změny průtoku také vyrovnání tlakových ztrát v jednotlivých větvích okruhu.

3.7 Výběr motorů pro pohon podávání a výměny vsázky

Jedná se o výpočty vedoucí k výběru správných komponent konstrukce, nebo ověření jejich funkce. Půjde tedy o výběr správného motoru pro pohon otáčení bubínku, ověření správné funkce magnetu a ověření správného výběru motoru pro posuv vsázky do osy hořáku.

Číslování wolframových tyčí je na Obrázku 30:



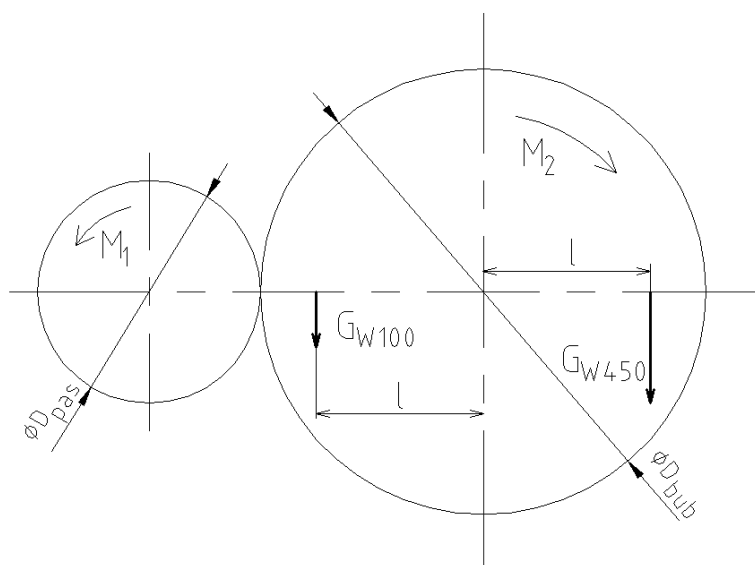
Obrázek 30 – Situace – pastorek – bubínek

Tyč, která je nejvýše, představuje tyč, která je v procesu krystalizace.

Vzhledem k poloze tyčí a směru gravitačního zrychlení je zřejmé, že tyče s čísly 1 a 3 nemají vzhledem k ose otáčení bubínku žádný moment.

Jednou ze dvou zmíněných hodnot je tedy logicky 0 N.m v případě, že tyče 2 a 4 působí stejným momentem opačných směrů, tzn. když jsou obě tyče stejně dlouhé. K tomuto případu dochází na začátku a na konci krystalizace, tzn. když jsou v procesu tyče č. 1 a 4.

Druhou hodnotu zatížení nabývá v okamžiku, kdy jsou v procesu tyče č. 2 a 3. Velikost zatížení lze pak snadno spočítat z výpočtového modelu na Obrázku 31.



Obrázek 31 – Výpočtový model pro stanovení kroutícího momentu

Ze vztahu pro převodový poměr lze odvodit:

$$M_1 = \frac{M_2}{i} \quad [N.m] \quad (43)$$

A zároveň:

$$i = \frac{D_{bub}}{D_{pas}} \quad [1] \quad (44)$$

, kde: D_{bub} ...průměr bubínku zásobníku [mm]

D_{pas} ...průměr hnacího kola [mm]

Obě tyto hodnoty byly změřeny v programu Autodesk Inventor 2009.

Po jejich dosazení do (44) dostáváme:

$$i = \frac{72}{18}$$

$$i = 4$$

Výpočet M_2 :

$$M_2 = G_{W450} \cdot l - G_{W100} \cdot l = S_w \cdot \rho_w \cdot g \cdot l \cdot (0,450 - 0,100) \quad [N.m] \quad (45)$$

, kde: S_{vs} ... je plocha průřezu vsázky $[m^2]$

l ... je vzdálenost tyčí od středu otáčení bubínku $[m]$

Geometrické parametry vsázky jsou zadány, a vzdálenost tyče od osy rotace bubínku l byla změřena v programu Autodesk Inventor 2009. Po dosazení:

$$M_2 = l \cdot \pi \cdot \frac{d_{vs}^2}{4} \cdot \rho_w \cdot g \cdot 0,350$$

$$M_2 = 0,019981 \cdot \pi \cdot \frac{0,01^2}{4} \cdot 19250 \cdot 9,81 \cdot 0,350$$

$$M_2 = 0,104 \text{ N.m}$$

Dosazením výsledku do (43) dostaneme výsledný moment zatěžující motor:

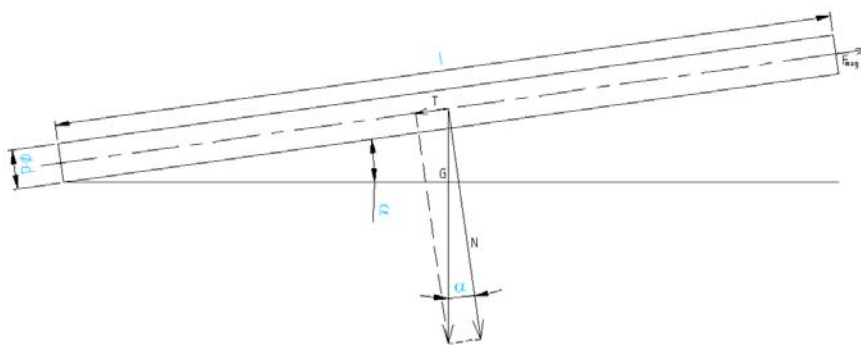
$$M_1 = \frac{0,104}{4} = 0,026 \text{ N.m}$$

Při volbě rotačního krokového motoru je tedy třeba dbát na tuto hodnotu. Námí vybraný motor Haydon 46440-05¹², viz. Obrázek 32, má krouticí moment $M_k = 0,06 \text{ N.m}$, z čehož je zřejmé, že je dobrou volbou.



Obrázek 32 – Haydon CanStack 46440-05

Při výběru magnetu jsme limitováni silou, kterou musí magnet být schopen vyvolat, a teplotní odolností. Jak bylo ukázáno v 3.5.1, předpokládaná teplota vsázky ve styku s magnetem nepřesáhne 250 °C. Sílu, kterou musí magnet vyvolat, lze určit z matematického modelu na Obrázku 33.



Obrázek 33 – Výpočtový model pro výběr magnetu

Z Obrázku 30 je zřejmé, že:

$$F_{mag} = T = G \cdot \sin \alpha = m_{vs} \cdot g \cdot \sin \alpha = \pi \cdot \frac{d_{vs}^2}{4} \cdot l_{vs} \cdot \rho_W \cdot g \cdot \sin \alpha \quad [N] \quad (46)$$

Úhel sklonu $\alpha = 8^\circ$ byl odměřen z 3D modelu v programu Autodesk Inventor 2009. Další potřebné údaje jsou uvedeny jako Příloha III. a v 3.5.1. Po dosazení tedy dostáváme:

$$F_{mag} = \pi \cdot \frac{0,01^2}{4} \cdot 0,450 \cdot 19250 \cdot 9,81 \cdot \sin 8^\circ$$

$$F_{mag} = 0,929 \text{ N}$$

Je nutno tedy vybrat magnet, který je schopen vyvolat sílu o velikosti minimálně 1N. Nakonec byl vybrán hrncový magnet SmCo^{13,14} o průměru $\phi d_{mag} = 6 \text{ mm}$ a výšce $h_{mag} = 4,5 \text{ mm}$ viz. Obrázek 34.



Obrázek 34 – SmCo magnet

Tento magnet je schopen vyvolat sílu $F_{mag} = 4,905\text{ N}$, což je plně dostačující.

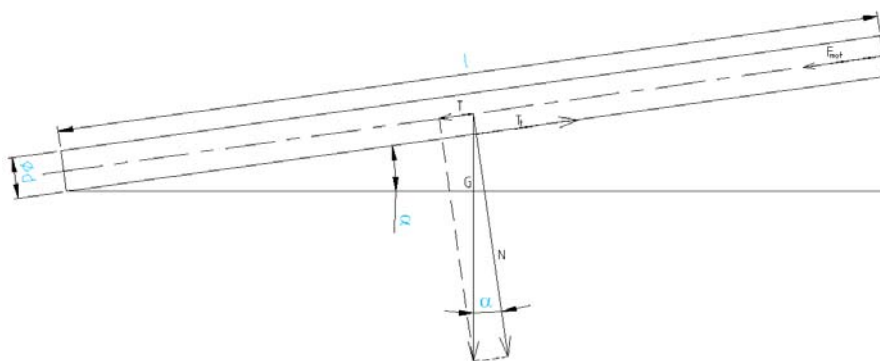
Při výpočtu bylo záměrně zanedbáno tření mezi magnetem a vedením. Toto zanedbání zvyšuje bezpečnost zvoleného magnetu.

Jako pohon pro posuv vsázky do osy plazmového hořáku a zpět byl předem vybrán a zakoupen motor Haydon size 17 series 43000 Non-Captive Linear Actuator¹⁵, viz. Obrázek 35.



Obrázek 35 – Haydon size 1700 43000 Non-Captive

Tento motor má maximální doporučené zatížení $F_{max} = 250\text{ N}$. Pro jeho kontrolu použijeme výpočtový model znázorněný na Obrázku 36.



Obrázek 36 – Výpočtový model pro ověření funkce aktuátoru

Z výpočtového modelu plyne:

$$F_{mot} \geq T_t - T = N \cdot f - G \cdot \sin \alpha = G \cdot (f \cdot \cos \alpha - \sin \alpha) \quad [N] \quad (47)$$

, kde: f ...součinitel tření wolfram-wolfram $f = 0,6$ ¹⁶

Po dosazení hodnot použitých v (38) dostáváme:

$$F_{mot} = 6,672 \cdot (0,6 \cdot \cos 8^\circ - \sin 8^\circ)$$

$$F_{mot} = 3,036 \text{ N}$$

Jak je zřejmé z výpočtu z hlediska potřebné síly pro pohon vsázky je motor silně předimenzován. Tento typ však byl zvolen z důvodu plné a velmi přesné říditelnosti přes PC.

4 Pracovní komora

Hlavní funkcí pracovní komory je uzavření prostoru, v němž dochází k přetavování vsázky ve výsledný monokrystal. Pracovní komora tento prostor ohraničuje jak mechanicky, tak i hermeticky a tepelně. Dále je komora spojovacím článkem mezi tažným zařízením, podavači a plazmovým hořákem.

4.1 Požadavky na funkci, bezpečnost, diagnostiku a řízení

Z funkčních požadavků se jedná o snadné spojení s obslužnými zařízeními pece, jako jsou podavače vsázky, zařízení pro tažení monokrystalu a o možnost snadného a přesného uchycení plazmového hořáku v požadované poloze vůči tavenému materiálu. Dále je nezbytně nutné, aby pracovní komora rozměrově umožňovala použití dříve navrženého chladiče monokrystalu. Zdánlivě v rozporu s tímto požadavkem je potom snaha o dosažení co nejmenšího odpadu ze vsázky. Vsázka je drahá a nedodržení tohoto požadavku by navíc vedlo k růstu rozměrů zařízení z důvodu nutnosti zvětšení podavačů.

Pro diagnostiku a řízení procesu bude použito několik zařízení. Hlavní měřenou veličinou bude teplota. Důležitá je zejména teplota taveniny, kterou lze díky její velmi vysoké hodnotě měřit pouze radiačním pyrometrem. Každý pyrometr má definovanou oblast měření. Pro optimalizaci její polohy na měřené ploše je žádoucí, aby osa měřicího paprsku na ni byla kolmá.

Vzhledem k použití jediného plazmového hořáku umístěného centrálně je dosažení ideální polohy pyrometru nemožné. Před spuštěním procesu bude nutno naprogramovat pohon podávání vsázky. Pro tuto operaci je nezbytné nastavit vsázku do pozice, v níž bude probíhat tavení, tzn. nasunout vsázku do osy plazmového hořáku. Protože je pracovní komora uzavřena, je potřeba pro tuto operaci umožnit její sledování pomocí nahlížecího otvoru a vhodného osvětlení.

Z hlediska bezpečnostního je nejdůležitějším aspektem chlazení, které musí splnit hygienické normy týkající se teploty vnějšího pláště pracovní komory. Chlazení bude samozřejmě zásadní i z hlediska udržení funkčnosti zařízení, neboť nedostatečné chlazení stejně jako lokální snížení chladicího výkonu může způsobit průvar, který by přerušil proces výroby a znehodnotil by monokrystal.

Výsledný požadavkový list je v Tabulce 18.

Tabulka 18 – Požadavkový list pracovní komory zařízení pro výrobu monokrystalu

	Přání	Nutnost
Funkční požadavky		
Spojení s tažným zařízením		X
Spojení s podavači		
- rozebíratelné	X	
- pevné		X
Uchycení plazmového hořáku		
- v ose pece	X	
- v ose krystalizátoru		X
Hermetizace celého prostoru		X
Možnost vytvoření vakua	X	
Chlazená stěna		X
Minimalizace odpadu vsázky		X
Diagnostické požadavky		
Měření teploty		X
- maximální hodnota 3340°C		X
- minimální oblast měření	X	
- měření teploty v různých místech taveniny	X	
- použití jednoho měřidla v různých místech zařízení	X	
Možnost nahlížení okem		
- před začátkem procesu		X
- v průběhu procesu	X	
Možnost záznamu procesu		
- nepřímým měřením veličin		X
- přímo pomocí kamery	X	
- kamera s připojením k PC a přenosem v síti	X	
Bezpečnostní požadavky		
Povrchová teplota pece 50°C		X
Teplota okuláru nahlížečského otvoru v rámci hygienických norem		X

4.2 Volba konstrukčních materiálů

Pracovní komora bude uzavřena dvouplošňovou, vodou chlazenou, nádobou.

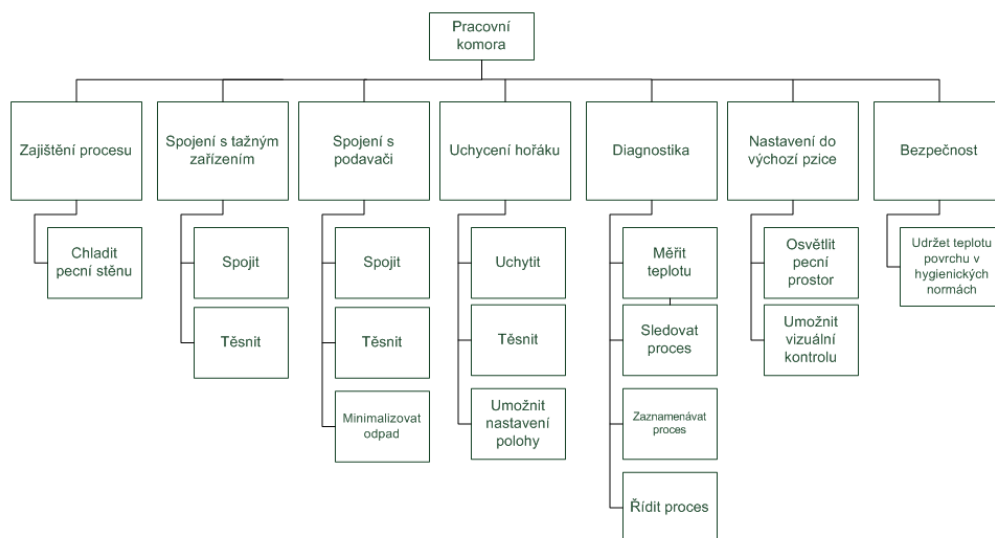
Vnější plášť bude z nerezové oceli. Jeho chladicí funkce je vzhledem k předpokládanému způsobu chlazení proudící vodou zanedbatelná. Předpokládanou hlavní funkcí vnějšího pláště je přenos zatížení. Nerezová ocel tuto funkci splňuje a navíc je dostatečně odolná vůči korozi. Společně s přijatelnou cenou je potom volba tohoto materiálu zcela oprávněná.

Materiál vnitřního pláště je nutno volit vzhledem k jeho primární funkci, kterou je odvod tepla z pracovní komory do chladicí vody.

4.3 Funkční struktura

Tak jako u chladiče monokrystalu a podavače vsázky, je i v tomto případě funkční struktura názorným zobrazením požadavků na konstrukci pracovní komory včetně jejich možných vzájemných vazeb. Z kapacitních důvodů je uvedena jako Příloha X.

Pro základní přehled uvažovaných funkcí je uveden hierarchický funkční strom, viz. Obrázek 37.



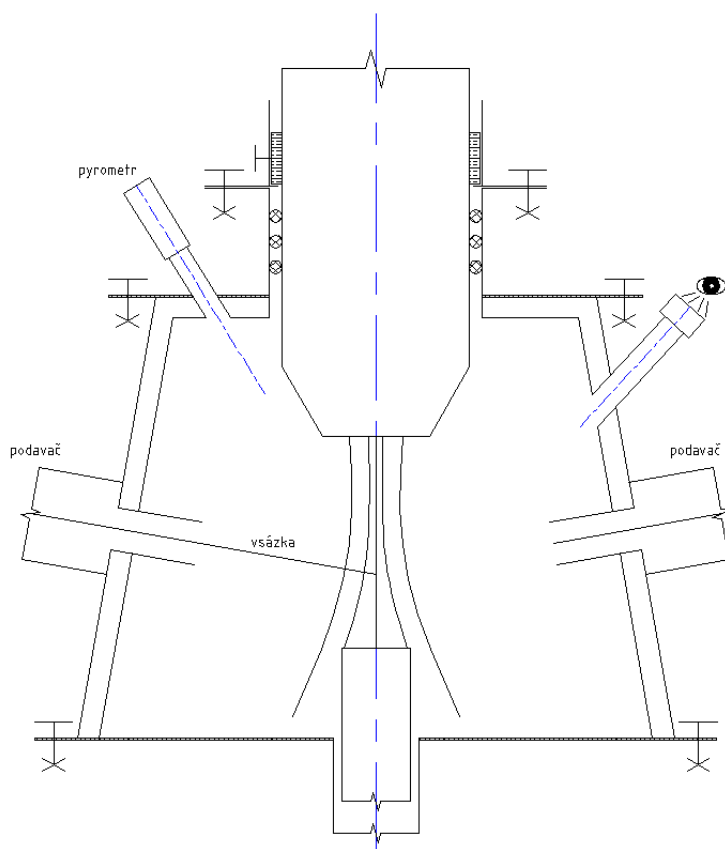
Obrázek 37 – Hierarchický funkční strom pracovní komory

4.4 Hrubá stavební struktura

Podobně jako tomu bylo u předchozích konstrukčních uzlů, je i v tomto případě pro stanovení hrubé stavební struktury nezbytná morfologická matice, která zobrazuje možné nositele jednotlivých funkcí i jejich kombinaci vybranou pro finální návrh.

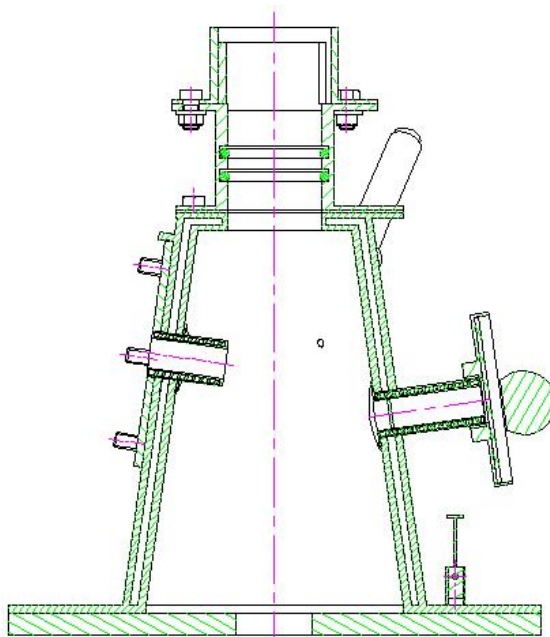
Z kapacitních důvodů je tato morfologická matice uvedena jako Příloha X.

Výběrem nejvhodnější kombinace, která je v morfologické matici naznačena červenou čarou, potom získáme orgánovou strukturu⁸, která je zřejmá z Obrázku 38.



Obrázek 38 – Orgánová struktura pracovní komory

Od ní je potom odvozena výsledná hrubá stavební struktura, která je na Obrázku 39.



Obrázek 39 – Hrubá stavební struktura pracovní komory

Z morfologické matice lze sestavit mnoho orgánových struktur a následně i hrubých stavebních struktur. Pro potřeby této zprávy byla vybrána pouze ta varianta, která byla podkladem pro finální návrh.

4.5 Úplná stavební struktura

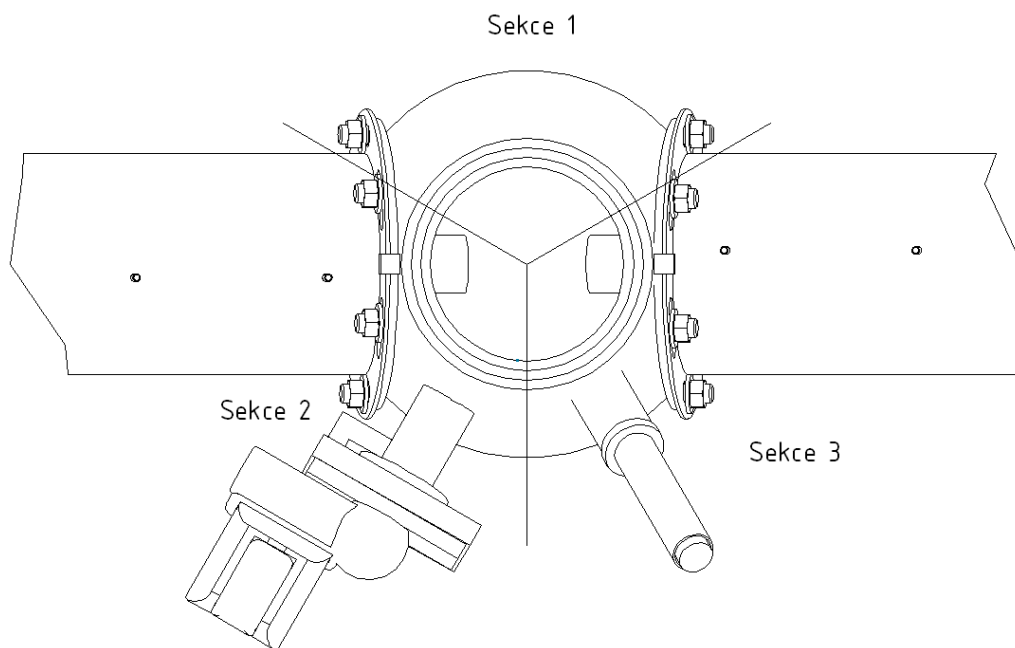
Úplná stavební struktura pracovní komory zařízení pro výrobu monokrystalu, je uvedena jako Příloha XI.

4.6 Výpočtová část

Výpočtová část pracovní komory obsahuje návrh parametrů chladicích okruhů. Hlavním úkolem výpočtové části bylo kromě stanovení parametrů chladicích okruhů pracovní komory také stanovení materiálu vnitřního pláště pracovní komory.

4.6.1 Návrh chladicích okruhů pracovní komory

Plášť pracovní komory jsem rozdělil do tří samostatných chladicích sekcí, jak je zřejmé z Obrázku 40.



Obrázek 40 – Rozdělení pracovní komory na chladicí sekce

Podobně, jako tomu bylo u podavače vsázky, i zde byl použit výpočet podobný výpočtu parametrů chlazení chladiče monokrystalu, tzn. vztahy (9) až (15), (20) až (25) a (28) až (32). Teplosměnná plocha kanálu, je jako u podavače, nahrazena v (24) vztahem (42).

Hodnota chladicího výkonu uvedená v (9) na levé straně, je převzata z tepelných bilancí plazmových pecí uvedených v 1.2. Plyne z ní, že chlazením pece je odváděno 15% instalovaného výkonu hořáku. Pro výpočet je tedy použita hodnota:

$$P_{stena} = 0,15 \cdot P$$

$$P_{stena} = 0,15 \cdot 60$$

$$P_{stena} = 9 \text{ kW}$$

Vzhledem k rozdělení pracovní komory na tři sekce, je uvažovaný chladicí výkon pro jednotlivou sekci třetinový, tzn. $P_{stena} = 3 \text{ kW}$.

Sekce 1 je bez jakýchkoliv otvorů. Vstupní hodnoty pro výpočet parametrů chlazení této sekce jsou uvedeny v Tabulce 19 a vypočtené hodnoty v Tabulce 20.

Tabulka 19 – Parametry chladicího kanálu pracovní komory – sekce 1

Parametr	Označení/jednotka	Hodnota
Šířka chladicího kanálu	a_{PK1}/m	0,005
Výška chladicího kanálu	b_{PK1}/m	0,007
Hydraulický průměr chladicího kanálu	d_{hPK1}/m	0,0058
Rychlost proudění vody	$w_{H2OPK1}/m.s^{-1}$	3
Délka chladicího kanálu	l_{PK1}/m	2,032
Teplota vody na vstupu do chladicího okruhu pracovní komory	$t_{kH2OPK1}/^{\circ}C$	15
Průměr ochlazované plochy pracovní komory	d_{2PK1}/m	0,145
Součinitel přestupu tepla stěny pracovní komory	$\lambda_{stPK1}/W.m^{-1}.K^{-1}$	373

Délky chladicího kanálu pracovní komory ve všech sekcích byly odměřeny na 3D modelu v programu Autodesk Inventor Professional 2009.

Tabulka 20 – Vypočítané hodnoty chladicího kanálu pracovní komory – sekce 1

Počítaná hodnota	Označení/jednotka	Hodnota
Ohřátí vody v chladicím kanále	$\Delta t_{H2OPK1}/^{\circ}C$	6,844
Součinitel teplotní vodivosti	$\alpha_{PK1}/W.m^{-1}.K^{-1}$	13847
Reynoldsovo kritérium	$Re_{PK1}/1$	17394
Teplota ochlazovaného povrchu stěny pracovní komory	$t_{stvnitniPK1}/^{\circ}C$	21,27
Teplota zahřívání povrchu stěny pracovní komory	$t_{stvnejsiPK1}/^{\circ}C$	50,53

V sekci 2 jsou dva otvory. Jeden je pro podavač vsázky a druhý je nahlížecí otvor. Průměr otvoru pro podavač je $\phi_{podavac} = 20\text{ mm}$ a pro nahlížecí otvor $\phi_{nahl} = 30\text{ mm}$. Vzhledem ke stejným rozměrům kanálu a rychlosti proudění je jediným parametrem, kterým se oba kanály liší, jejich délka. Pro

sekcí B je $l_{PKB} = 1,768$ m. Pro tyto parametry jsou výsledné hodnoty chladicího kanálu uvedeny v Tabulce 21.

Tabulka 21 – Vypočítané hodnoty chladicího kanálu pracovní komory – sekce 2

Počítaná hodnota	Označení/jednotka	Hodnota
Ohřátí vody v chladicím kanále	$\Delta t_{H2OPK2}/^{\circ}\text{C}$	6,844
Součinitel teplotní vodivosti	$\alpha_{PK2}/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	13847
Reynoldsovo kritérium	$Re_{PK2}/1$	17394
Teplota ochlazovaného povrchu stěny pracovní komory	$t_{stvnitniPK2}/^{\circ}\text{C}$	27,21
Teplota zahřívání povrchu stěny pracovní komory	$t_{stvnejsiPK2}/^{\circ}\text{C}$	51,46

V sekci 3 jsou také dva otvory. Podobně jako u úseku 2 je jeden otvor pro podavač a druhý je pro pyrometr $\phi_{pyr} = 4\text{ mm}$. Podobně jako tomu bylo u sekce B, jsou i tady rozměry chladicího kanálu a rychlost proudění vody stejné, jako tomu bylo u sekce A. Délka chladicího kanálu v této sekci je $l_{PKC} = 1,844$ m. Pro tyto parametry jsou výsledné hodnoty chladicího kanálu uvedeny v Tabulce 22.

Tabulka 22 – Vypočítané hodnoty chladicího kanálu pracovní komory – sekce 3

Počítaná hodnota	Označení/jednotka	Hodnota
Ohřátí vody v chladicím kanále	$\Delta t_{H2OPK3}/^{\circ}\text{C}$	6,844
Součinitel teplotní vodivosti	$\alpha_{PK3}/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	13847
Reynoldsovo kritérium	$Re_{PK3}/1$	17394
Teplota ochlazovaného povrchu stěny pracovní komory	$t_{stvnitniPK3}/^{\circ}\text{C}$	26,91
Teplota zahřívání povrchu stěny pracovní komory	$t_{stvnejsiPK3}/^{\circ}\text{C}$	51,17

Z Tabulek 20 až 22 je zřejmé, že je možno použít nerezovou ocel jako konstrukční materiál vnitřní stěny. Teplota zahřívaného povrchu stěny pracovní komory je ve všech sekcích přibližně 51°C a ocel tedy neztratí své mechanické vlastnosti.

4.6.2 Dimenzování kanálu vzhledem k tlakovým ztrátám

Stanovení tlakových ztrát má v případě chlazení pláště pracovní komory důležitou roli. V sekcích 2 a 3 je totiž nutno chladicí kapalinu vést okolo připojovacích prvků dalších částí zařízení.

Musí však platit, že tlakové ztráty v jednotlivých rozdělených částech kanálu se musí sobě navzájem rovnat. Tato rovnost musí platit mezi dvěma společnými body chladicího kanálu. S použitím (33) až (36) a při délce jednotlivých částí chladicího kanálu uvedených v Tabulce 23 a na Obrázcích 41 a 42 byly spočítány velikosti mezer znázorněné na Obrázcích 43 a 44 a uvedeny v Tabulce 24. Při výpočtu byl použitý následující vztahy pro výpočet součinitelů místní ztráty:

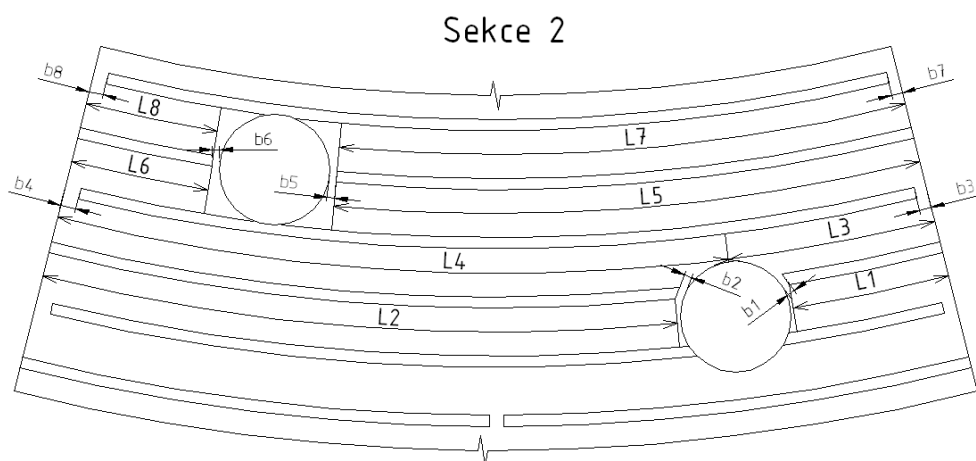
$$\zeta_{m1} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \quad [1] \quad (48)^{11}$$

, kde: S_1 ...plocha průřezu původního kanálu $[m^2]$

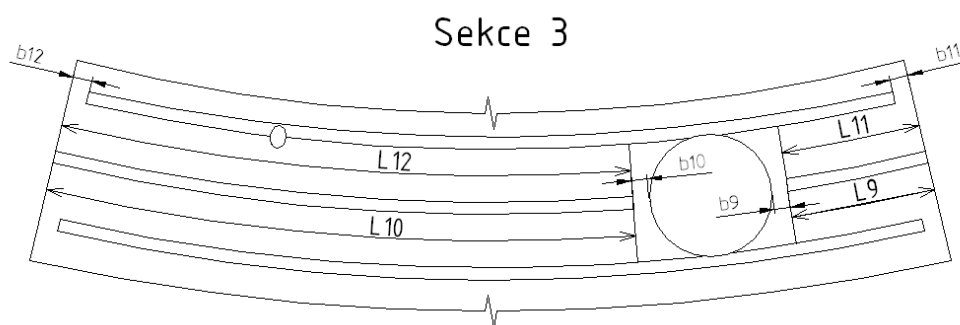
S_2 ...plocha průřezu kanálu po zúžení / rozšíření $[m^2]$

$$\zeta_{m2} = \left(\frac{S_2}{S_1} - 1\right)^2 \quad [1] \quad (49)^{11}$$

$$\zeta_m = \zeta_{m1} + \zeta_{m2} \quad [1] \quad (50)^{11}$$



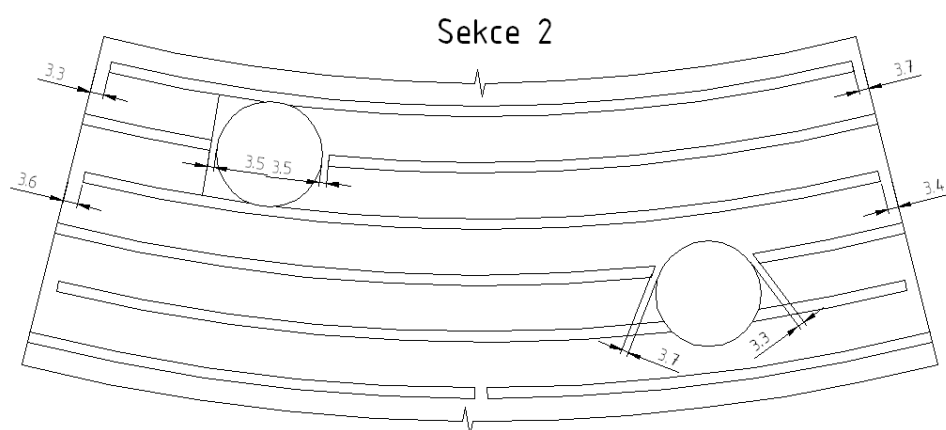
Obrázek 41 – Rozdělení chladicího kanálu v sekci 2



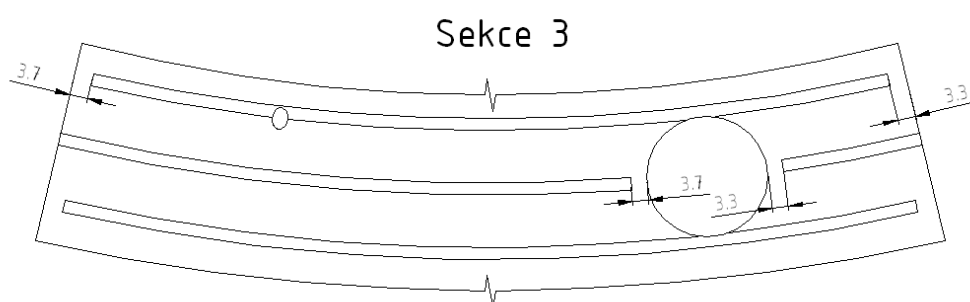
Obrázek 42 - Rozdělení chladicího kanálu v sekci 2

Tabulka 23 – Délky částí chladicích kanálů v sekcích 2 a 3

SEKCE 2	
L1	42,76 mm
L2	173,12 mm
L3	51,6 mm
L4	184,86 mm
L5	156,98 mm
L6	37,75 mm
L7	151,33 mm
L8	36,39 mm
SEKCE 3	
L9	30,83 mm
L10	140,55 mm
L11	29,78 mm
L12	135,78 mm



Obrázek 43 – Rozměry rozděleného kanálu v sekci 2



Obrázek 44 – Rozměry rozděleného kanálu v sekci 3

Tabulka 24 – Rozměry rozdělených kanálů v sekcích 2 a 3

SEKCE 2	
b1	3,3 mm
b2	3,7 mm
b3	3,4 mm
b4	3,6 mm
b5	3,5 mm
b6	3,5 mm
b7	3,7 mm
b8	3,3 mm
SEKCE 3	
b9	3,3 mm
b10	3,7 mm
b11	3,3 mm
b12	3,7 mm

Při dodržení těchto rozměrů kanálů je rozdíl v tlakových ztrátách jednotlivých částí v řádu stovek Pascalů. Tento rozdíl, resp. jeho další snižování je závislé na technologii spojení kanálu s pláštěm pracovního prostoru. Při předpokládaném způsobu tvorby kanálu, tj. přivaření svařovacího drátu ke stěně pracovní komory, je přesnost šířky mezery 0,1 mm dosažitelná jen s velkou dávkou zkušeností výrobce.

5 Diagnostika zařízení pro výrobu monokrystalu

Diagnostiku zařízení pro výrobu monokrystalu lze rozdělit do dvou skupin. První z nich je diagnostika procesu výroby monokrystalu a druhou je diagnostika samotného zařízení pro výrobu monokrystalu.

5.1 Diagnostika procesu monokrystalu

Pro zajištění kvalitního produktu je nezbytné sledovat a udržovat teplotu taveniny na definované úrovni. Změna teploty lázně je závislá na výkonu plazmového oblouku a na chladicím výkonu chladiče monokrystalu. Sledování teploty monokrystalu bude prováděno radičním pyrometrem, viz. Příloha XI.

Vzhledem k velmi vysoké teplotě tavení wolframu, která je uvedena v Příloze II., je pyrometrů vhodných k použití v této aplikaci velmi málo. Jako nejlepší z tohoto mála se jeví model OS1532-R8¹⁷ viz. Obrázek 45 firmy OMEGA.



Obrázek 45 – Radiční pyrometr Omega OS1532-R8

Jedná se o vysokorychlostní pyrometr využívající k měření infračervený paprsek s teplotním rozsahem do 3700°C. Při fixované vzdálenosti od

měřeného objektu $l = 300 \text{ mm}$ má jeho měřicí oblast průměr $\phi_{ob} = 12,45 \text{ mm}$. Tento pyrometr se vyrábí i s možností osvětlení vnitřního prostoru a s ofouknutím skla. Vzhledem k možnosti mnohem levnějšího řešení obou funkcí je možno tyto nemalé příplatky ušetřit. Pyrometr je doplněn vyhodnocovací a zobrazovací jednotkou s možností připojení k PC.

Pro sledování procesu je v plášti pracovní komory otvor pro navaření chlazeného vedení pro nahlížení okem, resp. kameru. Vzhledem k tomu, že wolfram je při teplotě blízké teplotě tavení velmi silným světelným zářičem a plasmový paprsek je zářičem širokého spektra záření o vysoké intenzitě, je potřeba oko případného pozorovatele chránit. Podobný problém není sice u kamery tak zásadní, neboť volbou vhodného softwaru by zřejmě bylo možno snížit citlivost kamery, avšak bude jednodušší, když i ona bude chráněna. Jako řešení byla vybrána instalace samostmívacího skla do svářečské kukly, které je dodáváno v katalogizovaném rozměru $110 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ o tloušťkách $6 \text{ mm} - 9 \text{ mm}$. Toto sklo bude namontováno na konec chlazeného vedení. Konkrétně byla vybrána LCD cartridge Optrel Brilliant firmy SPERIAN¹⁸ viz. Obrázek 46.



Obrázek 46 – LCD cartridge SPERIAN Optrel Brilliant¹⁸

Tato cartridge má čas zatmění $0,2 \text{ ms}$ při pokojové teplotě a rozměry jsou $110 \text{ mm} \times 90 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$.

Při výběru kamery byl upřednostněn systém ukládání záznamu na disk PC. Proto bylo možno použít webovou kameru. Jako ideální volba se jeví Logitech QuickCam Pro 9000¹⁹ s rozlišením HD viz. Obrázek 47.



Obrázek 47 – Logitech QuicCam Pro 9000

K diagnostice polohy pohyblivých částí zařízení, tzn. šroubů podavačů vsázek, natočení bubínků v podavačích a polohy monokrystalu bude použito SW od výrobce krokových motorů. Děličem kroku je schopen svou činností zajistit téměř plynulý pohyb taženého monokrystalu na úrovni $v_{\text{taž}}$, viz. 2.6.2. Přesnost plynoucí z řízení takového pohybu je dostatečně přesná pro stanovení polohy. Krokové lineární motory jsou téhož typu jako je motor pro tažení monokrystalu.

5.2 Diagnostika částí umožňujících výrobu monokrystalu

Z hlediska konstrukce zařízení pro výrobu monokrystalu a její diagnostiky je nutno sledovat zejména parametry chladicí kapaliny ve všech chladicích okruzích. Pro výběr správných regulačních a měřicích prvků je nutno znát průtoky v jednotlivých chladicích větvích a maximální tlakovou ztrátu v celém hydraulickém obvodu. Tlakové ztráty v jednotlivých větvích hydraulického systému lze určit stejně jako ve 2.8 pomocí vztahů (33) až (36). Výsledky výpočtů tlakových ztrát jsou uvedeny pro jednotlivé větve chladicího okruhu

uvedeny v Tabulce 25. Pokud se mění rychlost proudění vody v chladicím okruhu, potom je uvedena tlaková ztráta platná pro nejvyšší použitou rychlost.

Tabulka 25 – Tlakové ztráty v jednotlivých úsecích chladicího okruhu

Úsek chladicího okruhu	Tlaková ztráta	
Chladič monokrystalu		
- sekce A	10,04	kPa
- sekce B	13,41	kPa
- sekce C	43,03	kPa
Podavač vsázky		
- chlazení podavače	49,93	kPa
- chlazené vedení	17,37	kPa
Pracovní komora		
- sekce 1	86,22	kPa
- sekce 2	113,17	kPa
- sekce 3	123,95	kPa
- chlazení dna	138,46	kPa
- chlazení pecního víka	22,62	kPa
Vychlazovací komora		
- chlazení pláště	126,87	kPa
- chlazení dvířek	33,55	kPa

Průtoky v jednotlivých úsecích jsou dány vztahem:

$$Q_v = \pi \cdot \frac{d_h^2}{4} \cdot w_{H_2O} \quad \left[m^3 \cdot s^{-1} \right] \quad (51)^{20}$$

Vypočítané hodnoty průtoků v jednotlivých chladicích okruzích jsou uvedeny společně s celkovým průtokem v Tabulce 26.

Tabulka 26 – Průtoky v jednotlivých částech chladicího okruhu

Úsek chladicího okruhu			Průtok	
Chladič monokrystalu	d_h/mm	$w/\text{m.s}^{-1}$	$Q_v/\text{m}^3.\text{s}^{-1}$	
- sekce A	6,86	3,50	$1,29.10^{-4}$	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
- sekce B	7,64	2,30	$1,05.10^{-4}$	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
- sekce C	7,64	1,95	$8,93.10^{-5}$	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
Podavač vsázky				
- chlazení podavače	5,71	3,00	$7,68.10^{-5}$	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
- chlazené vedení	4,00	3,00	$3,77.10^{-5}$	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
Pracovní komora				
- sekce 1	5,83	3,00	$8,01.10^{-5}$	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
- sekce 2	5,83	3,00	$8,01.10^{-5}$	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
- sekce 3	5,83	3,00	$8,01.10^{-5}$	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
- chlazení dna	5,00	3,00	$5,89.10^{-5}$	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
- chlazení pecního víka	5,00	3,00	$5,89.10^{-5}$	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
Vychlazovací komora				
- chlazení pláště	5,48	1,50	$3,54.10^{-5}$	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
- chlazení dvířek	5,48	1,50	$3,54.10^{-5}$	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
Celkový průtok			$8,67.10^{-4} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$	

Na tyto průtoky byly vybrány měřicí a regulační prvky hydraulického obvodu zařízení pro výrobu monokrystalu.

Vzhledem k velmi podobným hodnotám průtoků a teplot chladicí kapaliny v jednotlivých chladicích kanálech byly vybrány všechny průtokoměry, teploměry i tlakoměry stejného druhu a od jednoho výrobce. Bylo přitom přihlíženo k možnosti použití společného měřiče.

Byl vybrán tlakoměr HubaControl 50193200321²¹ viz. Příloha XIII, teploměr STPt-050-A²², viz. Příloha XIV a průtokoměr FLUX FMO 1/P/P²³, viz. Příloha XV.

6 Archivace veličin ovlivňujících technologický proces výroby monokrystalu

Na potřebu archivace veličin ovlivňujících technologický proces výroby monokrystalu bylo myšleno již při výběru měřicích prvků. Všechny měřicí

prvky v hydraulickém obvodu uvedené v předchozí kapitole lze připojit k jedinému sběrnému zařízení. Tímto zařízením je INMAT 51²⁴, viz. Obrázek 51.



Obrázek 48 – INMAT 51²⁴

Toto zařízení umožňuje připojení až čtyř teploměrů a stejného počtu průtokoměrů. Dodávaný software výrobce SWK 46602²⁴ obstarává archivaci a SWK 46603²⁴ i programování. Tento přístroj je navíc možno propojit s data loggerem, kterým již naše katedra disponuje.

Archivace údajů o poloze vsázky a monokrystalu, je umožněna připojením všech krokových motorů k PC. Připojení je usnadněno pomocí Microstepping Driver R364²⁵, viz. Příloha XVI. Tato karta umožňuje propojení více krokových motorů k jedinému portu PC. Archivace veličin je potom otázka SW použitého v PC, řešit ji lze např. pomocí RAID diskových polí.

7 Řízení veličin ovlivňujících proces výroby monokrystalu

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, je řízení všech pohonů možno provést pomocí děliče kroku a PC. Pro řízení průtoků je v každé větvi zařazen škrticí ventil²⁶. Hydraulické schéma celého zařízení je uvedeno v Příloze XVII.

Podklady pro řízení průtoků v jednotlivých chladicích okruzích jsou potom získávány ze sběrného a měřicího zařízení INMAT51, které lze naprogramovat tak, aby byl kontrolován skutečný stav s plánovaným stavem.

8 Závěr

Protože bylo při návrhu zařízení pro výrobu monokrystalu vycházeno z energetických bilancí různých autorů, je nutno brát v úvahu možnost, že skutečná energetická bilance tohoto zařízení bude vykazovat jisté odchylky od předpokladů, které byly přijaty v průběhu návrhu. Další zpřesnění vstupních hodnot by vyžadovalo více provedených měření energetických bilancí na zařízení, podobnému tomu navrhovanému.

Otevřeným zůstává řízení procesu výroby monokrystalu. Navržení řídicího algoritmu však není v možnostech autora, takže by bylo vhodné zadat jej příslušné katedře nebo fakultě.

Po celou dobu řešení bylo důsledně myšleno na možnost plně automatického provozu zařízení a zařízení tak bylo navrženo, což dokazují programovatelné řídicí a regulační prvky jak hydraulického obvodu, tak i u pohonů.

Problematika zařízení pro výrobu monokrystalu je netradiční a pro vylepšení navrženého zařízení by bylo potřeba mnohem více času, než kolik bylo
autorovi
k dispozici.

9 Seznam příloh

- I - Blokové schéma technického procesu
- II - Morfologická matice chladiče monokrystalu
- III - Fyzikální vlastnosti wolframu použité v databázi materiálu pro simulaci MKP
- IV - Hodnoty použité pro výpočet součinitele přestupu tepla α
- V - Parametry chladicích kanálů chladiče monokrystalu a vypočítané hodnoty
- VI - Dílčí tlakové ztráty v chladicím kanále sekce C chladiče monokrystalu na začátku procesu výroby
- VII - Funkční struktura podavače vsázky
- VIII - Morfologická matice podavače vsázky
- IX - Fyzikální vlastnosti mědi
- X - Funkční struktura pracovní komory
- XI - Morfologická matice pracovní komory
- XII - Úplná stavební struktura pracovní komory
- XIII - Tlakoměr HubaControl 50193200321
- XIV – Teploměr STPt-050-A
- XV – Průtokoměr FLUX FMO 1/P/P
- XVI – Microstepping Driver R364
- XVII – Hydraulické schéma zařízení pro výrobu monokrystalu

10 Seznam použitých pramenů

- 1) KRČ, R. *Zařízení pro tažení monokrystalu*. Ostrava: katedra výrobních strojů a konstruování, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007, 52 s. Bakalářská práce, vedoucí Noga, Z.
- 2) Czochralski process – Wikipedia, the free encyclopedia, *Czochralski process*. [online].[cit.2009-18-01]. Dostupný na WWW:<
http://en.wikipedia.org/wiki/Czochralski_process>
- 3) Crystal Growth, *Crystal Growth* [online].[cit.2009-11-04]. Dostupný na WWW:<
http://www.fisk.edu/~aburger/Published03_06/Sample_prep/Crystal_growth/crystal_growth.html>
- 4) Uvic Crystal Growth Unit, *Techniques used*. [online].[cit.2009-11-04]. Dostupný na WWW:< <http://www.me.uvic.ca/~cgl/techniques.html>>
- 5) DEMBOVSKÝ, V. *Plazmová metalurgie* Praha: SNTL Nakladatelství technické literatury. 1978. 264 s. bez ISBN
- 6) MORDZYNSKI, A. GRZESOWIAK, K. Heat Balance of Prototype Plasma Furnace for Melting Reative Materials. In *Material Science (Madžiotyra)*. September 2005, vol. 11, no. 4, s. 360-363. ISSN:1392-1320
- 7) JABLONSKÝ, D. NOGA. Vývojová tendence v konstrukci zařízení pro výzkum materiálů pomocí plazmové technologie. In *TRANSFER 2004 – Zborník prednášok zo 6. medzinárodnej vedeckej konferencie*. Trenčín: Fakulta

špeciálnej techniky, Trenčianská univerzita A. Dubčeka, 2004, s 209 - 212, ISBN 80-8075-030-0.

8) HUBKA, V. *Konstrukční nauka: Obecný model potupu při konstruování*. Zürich: Heurista, 1995. 118 s. ISBN 80-90 1135-0-8

9) VOMOČIL, Z. HAJKR, Z. JUREČKA, P. *Cvičení do sdílení tepla a proudění* Ostrava: VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. 2000. 102 s. ISBN 80-7078-793-7

10) KADLEC, Z. *Termomechanika: Návod do cvičení* Ostrava: VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. 2001. 97 s. ISBN 80-7078-912-3

11) DRÁBKOVÁ, S. KOZUBKOVÁ, M. *Cvičení z mechaniky tekutin* Ostrava: VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. 2002. 141 s. ISBN 80-248-0039-X

12) 46000 Series Can-Stack Rotary Motors, *46000 series 46mm ROTARY STEPPER MOTOR*. [online].[cit.2009-25-04]. Dostupný na WWW:<
<http://www.hsi-inc.com/Products/StepperMotorLinearActuators/RotaryStepperMotors/CanStackRotaryMotors/46000CanStack/tabid/104/Default.aspx>>

13) TKB-KIPONS plus, spol. s r.o., *Ploché magnety v kovovém pouzdru.*

[online].[cit.2009-25-04]. Dostupný na WWW:<

http://eshop.tkb.cz/index.php?str=katalog_detail&kateg_id=5012®cis=ploche_magnety>

14) WAMAG homepage, *Tabulka velikostí a vlastností permanentních magnetů SmCo magnety.* [online].[cit.2009-25-04]. Dostupný na WWW:<

<http://www.wamag.cz/smco.php>>

15) 43000 Size 17 Linear Actuator Stepper Motor, *43000 SERIES SIZE 17 LINEAR ACTUATORS.* [online].[cit.2009-25-04]. Dostupný na WWW:<

<http://www.hsi-inc.com/Products/StepperMotorLinearActuators/HybridLinearActuators/43000Series/tabid/79/Default.aspx#noncaptive>>

16) Hodnoty součinitelů místních ztrát – zdroje tepla a základní tvarovky potrubí -TZB-info, *Hodnoty součinitelů místních ztrát – zdroje tepla a základní tvarovky potrubí.* [online].[cit.2009-21-04]. Dostupný na WWW:<

<http://vetrani.tzb-info.cz/t.py?t=16&i=21&h=38&obor=7>>

17) High Speed I/R Detectors. Models: OS1512-(*), OS1532-(*), *High Speed I/R Detectors OS1512 OS 1532.* [online].[cit.2009-21-04]. Dostupný na

WWW:<

http://www.omega.com/ppt/pptsc.asp?ref=OS1512_1532&Nav=temj12>

18) Optrel Brilliant – SPERIAN Welding Protection Switzerland AG,

SPERIAN > Products > Discontinued Products > Optrel Brilliant.

[online].[cit.2009-21-04]. Dostupný na WWW:<

<http://www.optrel.com/en/index.php?site=tbdproducts&product=brilliant&detail=cartdetail>>

19) Logitech > Webcams + Communications > Webcams > QuickCam® Pro 9000, *QuickCam® Pro 9000*. [online].[cit.2009-21-04]. Dostupný na WWW:< http://www.logitech.com/index.cfm/webcam_communications/webcams/devices/3056&cl=us,en#>

20) BLÁHA, J. BRADA, K. *Hydraulické stroje: celostátní vysokoškolská příručka pro skupinu studijních oborů Strojírenství a ostatní kovodělná výroba*. Praha: SNTL – Státní nakladatelství technické literatury. 1992. 747 s. ISBN 80-03-00665-1

21) A.P.O. – ELMOS – Snímače relativního a absolutního tlaku. *Tlak – Snímače absolutního a relativního tlaku* [online].[cit.2009-03-05]. Dostupný na WWW:< http://www.apoelmos.cz/cz/info/s-tlak22.htm#zalh_p1429>

22) A.P.O. – ELMOS – Odporové snímače teploty do jímky. *Teplota - Odporové snímače teploty – Odporové snímače teploty do jímky* [online].[cit.2009-03-05]. Dostupný na WWW:< http://www.apoelmos.cz/cz/info/s-teplota3.htm#zalh_p26>

23) A.P.O. – ELMOS – Plováčkové, turbínové a jiné průtokoměry. *Průtok a teplo – Měření průtoků – Plováčkové, turbínové a jiné průtokoměry* [online].[cit.2009-03-05]. Dostupný na WWW:< http://www.apoelmos.cz/cz/info/s-teplota3.htm#zalh_p26>

24) A.P.O. – ELMOS – Měření tepla. *Průtok a teplo – Měření průtoků*. [online].[cit.2009-03-05]. Dostupný na WWW:< http://www.apoelmos.cz/cz/info/s-prutok_teplo68.htm#zalh_p503>

25) Stepper Motors Controllers. *Stepper Motors Driver – Stepper Motor Power Stages*. [online].[cit.2009-03-05]. Dostupný na WWW:<

http://www.apoelmos.cz/cz/info/s-prutok_teplo68.htm#zalh_p503>

26) Škrtící ventily série T15 – Automatizace strojů. *Škrtící ventily série T15*.

[online].[cit.2009-03-05]. Dostupný na WWW:<

<http://www.ingstuksa.cz/kuk/pneumaticke-ventily-a-prislusenstvi/ventily-s-regulaci-prutoku/skrtici-ventily-serie-t15>>

27) RAŽNJEVIĆ, K. *Termodynamické tabulky* Bratislava: Alfa – vydavateľstvo technickej literatúry. 1984. 313 s. bez ISBN

Přílohy

I. – Blokové schéma technického procesu

II. - Morfologická matice chladiče monokrystalu

III. – Fyzikální
použité
pro simulaci

Veličina
Měrná tepelná kapacita
Koeficient tepelné vodivosti
Hustota
Emisivita
Teplota tání

IV. - Hodnoty
součinitele

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$	998 kg.m ⁻³
$c_{p\text{H}_2\text{O}}$	4183 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
$\lambda_{\text{H}_2\text{O}}$	0,598 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
$\nu_{\text{H}_2\text{O}}$	1,006.10 ⁻⁶ m ² .s ⁻¹
$\rho_{\text{H}_2\text{O}p}$	992 kg.m ⁻³
$c_{p\text{H}_2\text{O}p}$	4175 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
$\lambda_{\text{H}_2\text{O}p}$	0,627 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
$\nu_{\text{H}_2\text{O}p}$	0,657.10 ⁻⁶ m ² .s ⁻¹
t_{stvnitri}	40 °C

V. – Parametry
chladiče
vypočítané

Dílčí funkce	Funkční principy / Orgány - nstitelé funkcí		
	1	2	3
Umístění do pracovní komory			
1. Spojit s pracovní komorou	Šroubovým spojem	Svěrným spojem	Tvarovým spojem
11. Zajistit souosost s hořákem	Mechanickým spojením s hořákem	Mechanickým spojením s částí s tuhým spojením s hořákem	Stavitelným uložení v komoře
Rozložit chladičí výkon			
21. Zajistit chladičí výkon	Studenou technickou	Chlazení vodou	Chlazení kapalným plynem
22. Rozložit chladičí výkon	Dělení do více sekcí	Chemicky čistěnou horkou	
23. Měřit chladičí výkon	V jednotlivých sekcích	Změna geometrie chladiče	Kombinace obou možností
24. Řídit chladičí výkon	Změnou průtoku	Kumulovaně - celkový chladičí výkon	
25. Zaznamenávat změnu v průběhu	Moduly na měřidlech	Změnou teploty chladičího média	

vlastnosti wolframu
v databázi materiálu
MKP²⁷

C]				
000	1500	2000	2400	
144	149	-	-	
8,855	113,97	136,07	146,54	

použité pro výpočet
přestupu tepla α

chladičích kanálu
monokrystalu a
hodnoty

Začátek	a_{kan}	b_{kan}	w_{H_2O}	Re	Δt_{H_2O}	α	$t_{stvnitrni}$	t_{stpec}
	[mm]	[mm]	[m.s ⁻¹]	[1]	[°C]	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	[°C]	[°C]
SEKCE A								
- část 1	6	10,5	1,5	10022,4	0,239	6777,6	19,377	19,418
- část 2							19,611	19,657
- část 3							19,845	19,896
- část 4							20,079	20,135
SEKCE B								
- část 1	6	10,5	1,5	10022,4	0,319	6777,6	20,83	20,891
- část 2							21,14	21,21
- část 3							21,45	21,529
- část 4							21,76	21,848
SEKCE C								
- část 1	6	8	1,9	11399,7	0,479	8366,7	21,25	21,34
- část 2					0,474		21,67	21,75
- část 3					0,474		22,14	22,23
- část 4					0,474		22,61	22,71

Běh	a_{kan}	b_{kan}	w_{H_2O}	Re	Δt_{H_2O}	α	$t_{stvnitrni}$	t_{stpec}
	[mm]	[mm]	[m.s ⁻¹]	[1]	[°C]	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	[°C]	[°C]
SEKCE A								
- část 1	6	10,5	1,95	13029,2	0,459	8360,5	23,86	23,97
- část 2							24,32	24,43
- část 3							24,78	24,89
- část 4							25,24	25,35
SEKCE B								
- část 1	6	10,5	2,2	14699,6	0,489	9207,5	24,65	24,79
- část 2							25,14	25,28
- část 3							25,63	25,77
- část 4							26,12	26,26
SEKCE C								
- část 1	6	8	2,5	14999,6	0,615	10420,8	23,47	23,63
- část 2					0,611		24,04	24,19
- část 3					0,611		24,65	24,8
- část 4					0,611		25,26	25,41

Konec		a _{kan}	b _{kan}	w _{H2O}	Re	Δt _{H2O}	α	t _{stvnitrni}	t _{stpec}
		[mm]	[mm]	[m.s ⁻¹]	[1]	[°C]	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	[°C]	[°C]
SEKCE A									
	- část 1	6	10,5	1,45	9688,4	0,577	6596,3	25,48	25,59
	- část 2							26,06	26,17
	- část 3							26,64	26,75
	- část 4							27,22	27,33
SEKCE B									
	- část 1	6	10,5	2,3	15367,8	0,519	9540,8	25,35	25,51
	- část 2							25,87	26,03
	- část 3							26,39	26,55
	- část 4							26,91	27,07
SEKCE C									
	- část 1	6	8	3,5	20999,5	0,652	13639,8	24,61	24,83
	- část 2					0,649		25,22	25,45
	- část 3					0,649		25,87	26,09
	- část 4					0,649		26,52	26,73

VI. – Dílčí tlakové ztráty v chladicím kanále sekce C chladiče monokrystalu na začátku procesu výroby

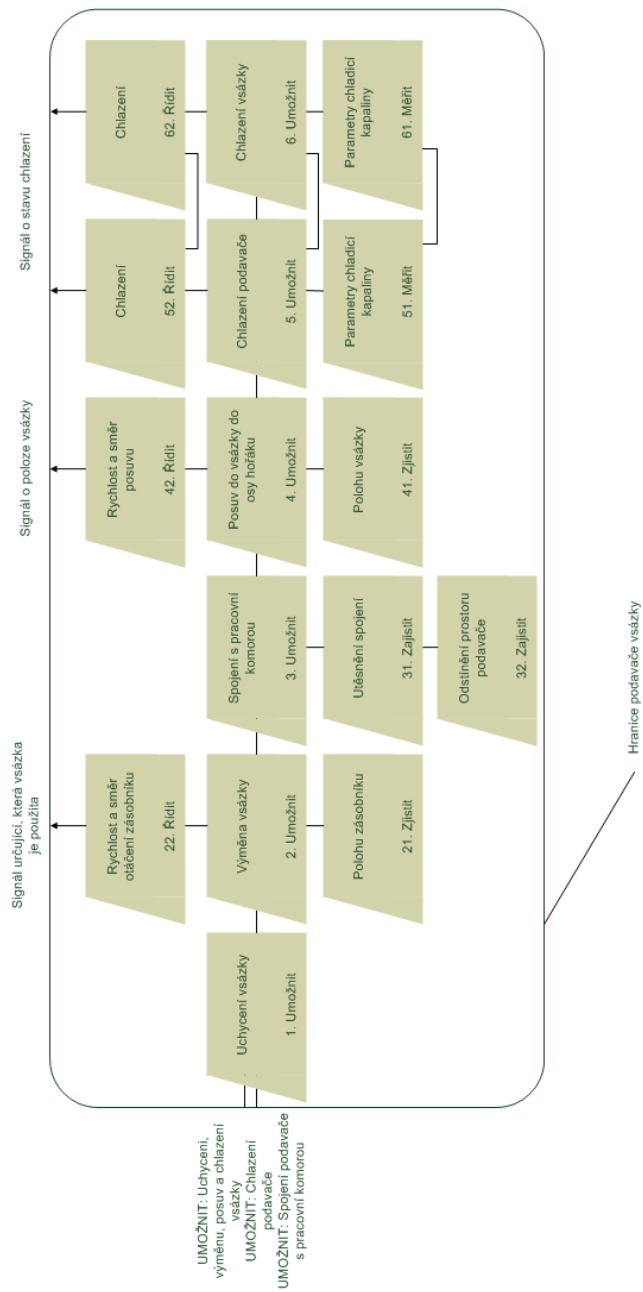
SEKCE C - Začátek

Přívod chladicí kapaliny	
Třecí ztráta 1	
d_{h1}	6 mm
l_1	80 mm
w_1	2,17138333 m.s ⁻¹
Re_1	11428,33 -
λ_1	3,06E-02 -
p_{zt1}	959,959769 Pa
Místní ztráta 90° oblé koleno	
ζ_{m1}	0,4 -
w_2	2,17138333 m.s ⁻¹
p_{zm1}	5,6578867 Pa
Třecí ztráta 2	
d_{h1}	6 mm
l_2	5 mm
w_1	2,17138333 m.s ⁻¹
Re_1	11428,33 -
λ_1	0,03060136 -
p_{zt2}	59,9974855 Pa
Místní ztráta 90° oblé koleno	
p_{zm1}	5,6578867 Pa
Třecí ztráta 2	
d_{h1}	6 mm
l_2	5 mm
w_1	2,17138333 m.s ⁻¹
Re_1	11428,33 -
λ_1	0,03060136 -
p_{zt2}	59,9974855 Pa
Místní ztráta - přechod přes otvor ve stěně chladiče	
ζ_{m2}	0,727 -
w_3	4,34276667 m.s ⁻¹
p_{zm2}	41,1328363 Pa

Chladicí kanál	
Místní ztráta 90° ostré koleno	
ζ_{m2}	1,2 -
w_{H_2O}	1,9 m.s ⁻¹
p_{zm2}	14,8523 Pa
Třecí ztráta	
a_{kan}	6 mm
b_{kan}	8 mm
d_{hkan}	6,857 mm
l_{kan}	1513 mm
w_{H_2O}	1,9 m.s ⁻¹
Re	11428,33 -
λ	3,06E-02 -
p_{zm5}	12163,4 Pa

Odvod chladicí kapaliny	
Místní ztráta 90° ostré koleno	
p_{zm1}	14,852262 Pa
Místní ztráta - přechod přes otvor ve stěně chladiče	
p_{zm2}	41,1328363 Pa
Třecí ztráta 3	
d_{h1}	6 mm
l_3	5 mm
w_1	2,17138333 m.s ⁻¹
Re_1	11428,33 -
λ_1	0,03060136 -
p_{zt3}	59,9974855 Pa
Místní ztráta 90° oblé koleno	
p_{zm1}	5,6578867 Pa
Třecí ztráta 4	
d_{h1}	6 mm
l_4	110 mm
w_1	2,17E+00 m.s ⁻¹
Re_1	11428,33 -
λ_1	3,06E-02 -
p_{zt4}	1319,94468 Pa

VII. – Funkční struktura podavače vsázky



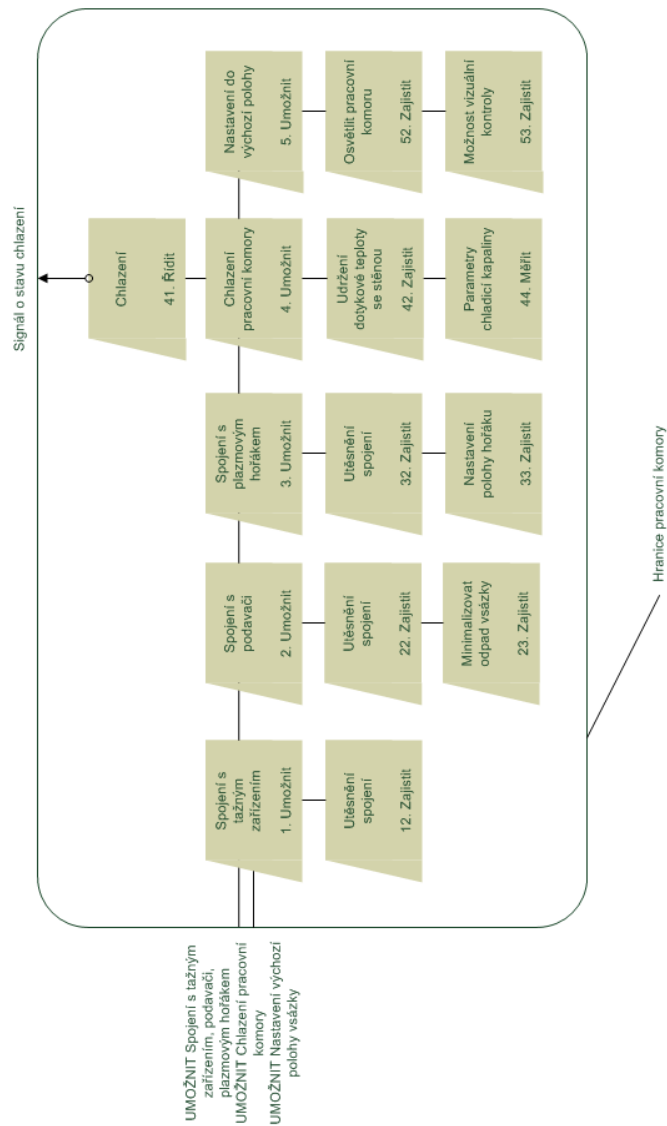
VIII. – Morfologická matice podavače vsázky

Dílič funkce	Funkční principy / Orgány - nositelé funkcí			
	1	2	3	4
Uchycení vsázky				
1. Umožnit	Čelistmi	Mechanicky Samosvorným kuželem	Závitem	Magnetickou silou
Výměna vsázky				
2. Umožnit	Vhodným uchycením	Pomocí programování pohonu	Tvarovým spojem	
21. Zjistit polohu zásobníku	Optoelektrické měření	Diagnostika polohy pohonu Pomocí SW motoru	Spojením se snímačem úhlu natočení	
22. Řídit rychlost a směr otáčení zásobníku	Pomocí SW motoru přes PC	Řízení pohonu Ručně		
Spojení s pracovní komorou				
3. Umožnit	Přírubou	Svčným spojem	Tvarovým spojem	
31. Těsnit	Ploché těsnění	O-kroužek	Labyrintové těsnění	
32. Odstínit	Minimalizací otvoru ve stěně komory	Použitím stínící plochy	Použitím chlazené spojovací části	
Posuv vsázky do osy hořáku				
4. Umožnit	Hydraulickým válcem	Pohybovým šroubem		
41. Zjistit polohu vsázky	Magneticky	Pomocí SW pohonu		
42. Řídit rychlost a směr posuvu	Pomocí SW motoru přes PC	Řízení pohonu Ručně		
Chlazení podavače				
5. Umožnit	Studenou technikou	Chlazení vodou	Výparné chlazení	Ofukem
51. Měřit parametry chladicí kapaliny	Přímo - Před i za chladicím okruhem	Chemicky upravenou teklinou Nepřímo - Spolu s dalším chladicím okruhem		
52. Řídit chladicí soustavu	Vzdáleně použitím regulačních prvků říditelnými přes PC	Ručně		
Chlazení vsázky				
6. Umožnit	Chlazením vedení	Ofukem	Kombinací	
61. Měřit parametry chladicí kapaliny	Přímo - Před i za chladicím okruhem	Nepřímo - Spolu s dalším chladicím okruhem		
62. Řídit chladicí soustavu	Vzdáleně použitím regulačních prvků říditelnými přes PC	Ručně		

IX. – Fyzikální vlastnosti mědi²⁷

Veličina	Označení/jednotka	Teplota [°C]				
		0	20	100	200	300
Měrná tepelná kapacita	$c_p/J.kg^{-1}.K^{-1}$	379	381	388	397	401
Koeficient tepelné vodivosti	$\lambda/W.m^{-1}.K^{-1}$	386,116	-	379,138	373,323	-
Hustota	$\rho/kg.m^{-3}$	8930				
Emisivita	$\epsilon/1$	0,78				

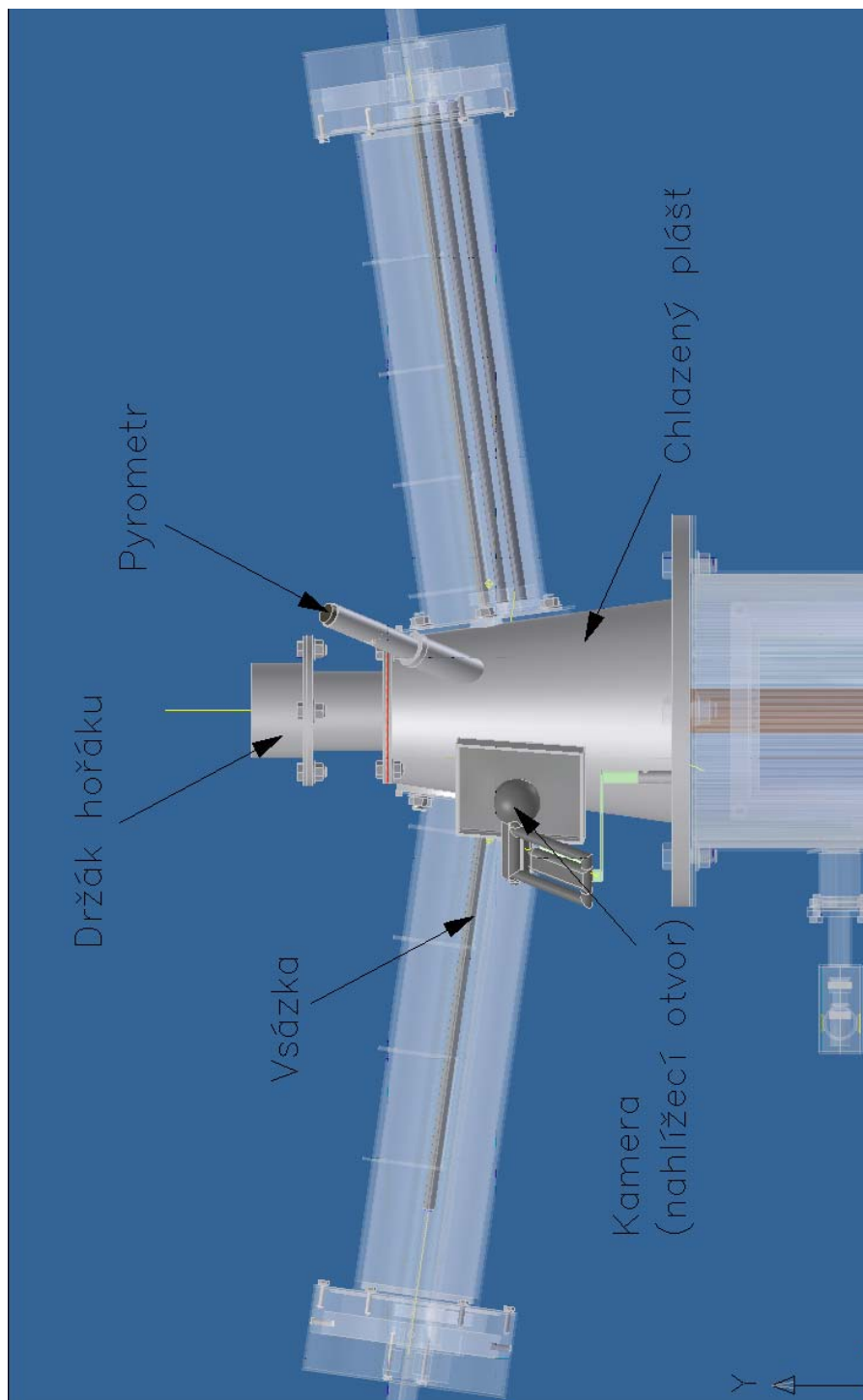
X. – Funkční struktura pracovní komory



XI. – Morfologická matice pracovní komory

Dílčí funkce	Funkční principy / Orgány - nositelé funkcí			
	1	2	3	4
Zajištění procesu				Použitím vhodné vyzdívky
1. Ochrana pecní stěny	Studenou technikou	Chlazení vodou	Výparné chlazení	
Spolení s tažným zařízením		Chemicky čistěnou horkou		
2. Spojit	Šroubovým spojem	Svěrným spojem	Tvarovým spojem	
3. Těsnit	Ploché těsnění	O-kroužek	Labyrintové těsnění	
Spolení s podavači				
4. Spojit	Šroubovým spojem	Svěrným spojem	Tvarovým spojem	
5. Těsnit	Ploché těsnění	O-kroužek	Labyrintové těsnění	
6. Minimalizovat odpad	Změnění průměru pecního prostoru	Chlazením vsázky v pecním prostoru	Kombinací obou možností	
Uchycení hořáku				
7. Uchytit	Šroubovým spojem	Svěrným spojem	Tvarovým spojem	
8. Nastavení polohy umožnit	Pohybem hořáku	Pohybem uchycení na straně pece		
9. Těsnit	O-kroužek	Labyrintové těsnění		
Diagnostika				
10. Umožnit měření teploty monokrystalu	Radiačním pyrometrem			
11. Umožnit sledování procesu	Okem	Uchycenou napěvno	Snímátelnou	
12. Umožnit zaznamenávání procesu	S vlastním záznamovým zařízením	Přímo - kamerou	Nepřímo	
13. Umožnit řízení procesu	Manuálně	Lokálně	Záznam z měřících přístrojů	
Nastavení do výchozí polohy		Automaticky pomocí PC	Vzdáleně	
14. Osvětlit pecní prostor	Žárovka	Stálé osvětlení	Dočasné osvětlení	LED dioda
15. Umožnit vizuální kontrolu	Okem	Kamerou	Žárovka	
Bezpečnost			Oba způsoby	
16. Udržet povrchovou teplotu na úrovni hygienických norem	Oběhové chlazení vodou	Použitím vhodné vyzdívky	Sprchové chlazení	

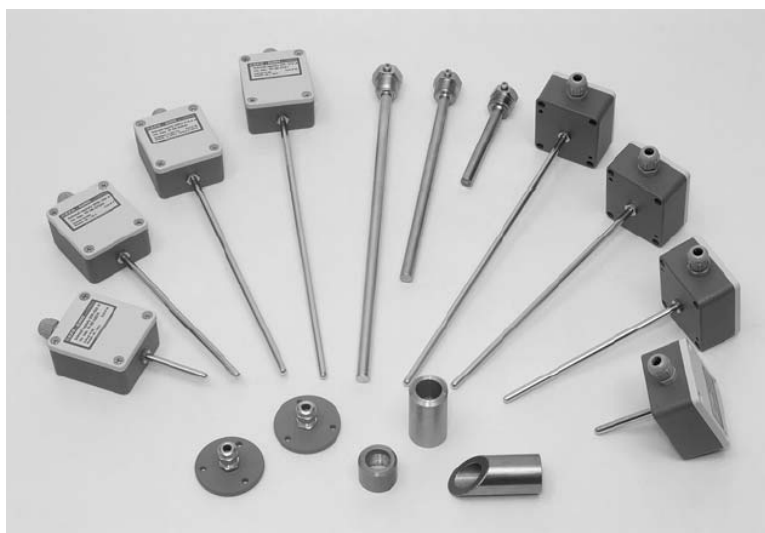
XII. – Úplná stavební struktura pracovní komory



XIII - Tlakoměr HubaControl 50193200321²¹



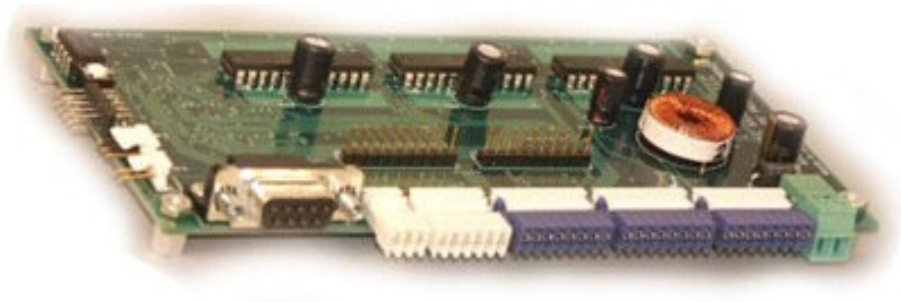
XIV - Teploměr STPt-050-A²²



XV - Průtokoměr FLUX FMO 1/P/P²³



XVI – Microstepping Driver R364



XVII – Hydraulické schéma zařízení pro výrobu monokrystalu

